Ю. И. Грибанов



ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ В РАДИОЛЮБИТЕЛЬСКОЙ ПРАКТИКЕ





6Ф2.08
Г 82
УДК 621.317.3

Грибанов Ю. И.

Г 82

Измерения и приборы в радиолюбительской практике, М., «Энергия», 1969.

192 стр с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 697)

Книга посвящена вопросам измерения токов, напряжений, сопротивлений, индуктивностей, емкостей, частоты и других электрических величин применительно к радиоэлектронным устройствам. Подробно рассмотрены методы измерений и соответствующие им измерительные приборы. Даны рекомендации по изготовлению ряда приборов. Приведены основные сведения из метрологии.

Рассчитана на широкие круги радиолюбителей.

3-4-5
350-69

6Ф2.08

Грибанов Юрий Иванович

Измерения и приборы в радиолюбительской практике

Редактор *Ф. И. Тарасов*
Обложка художника *А. М. Кувшинникова*
Технический редактор *Г. Е. Ларионов* Корректор *В. С. Антипова*

Сдано в набор 20/IX 1968 г. Подписано к печати 12/II 1969 г. Т-02560. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 1. Усл. печ. л. 10,08. Уч.-изд. л. 13,2. Тираж 50 000 экз. Цена 53 коп. Зак. 116

Издательство «Энергия». Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 1 «Печатный Двор» имени А. М. Горького Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР, г. Ленинград, Гатчинская ул., 26.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Проверка, налаживание и ремонт радиоприемника, телевизора или другого радиоэлектронного устройства сопровождаются, как правило, различного рода измерениями. Радиолюбителю чаще всего приходится измерять токи и напряжения в цепях ламп или транзисторов, сопротивление резисторов, емкость конденсаторов, индуктивность катушек, а также частоту и форму электрических колебаний в разных точках схемы радиоустройства.

Измерения многочисленных электрических величин, да еще с широкими пределами их значений требуют соответствующих измерительных приборов. Чтобы получить наиболее точный результат, необходимо применить наиболее подходящий метод измерения и правильно выбрать тот или иной измерительный прибор. А для этого нужно, конечно, хорошо представлять себе принцип действия приборов различных систем и типов, знать их возможности и особенности применения.

Эта книга предназначена в основном для широкого круга радиолюбителей. Главная цель ее заключается в том, чтобы помочь радиолюбителю сознательно подходить к измерениям различных электрических величин путем рационального выбора метода и прибора, а также к конструированию необходимых ему измерительных устройств.

В книге приводятся некоторые сведения из метрологии, рассматриваются различные методы измерений. Особое внимание уделено в ней широко распространенным электромеханическим измерительным приборам, их градуировке и поверке. Большая часть книги посвящена измерениям напряжений, токов, сопротивлений, емкостей, индуктивностей и частоты в цепях радиоэлектронных устройств. Наряду с этим описаны конструкции ряда измерительных приборов, построенных автором.

Ю. ГРИБАНОВ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ МЕТРОЛОГИИ

1. Виды и методы измерений

Измерение есть процесс сравнения данной величины с некоторым ее значением, принятым за единицу. Понятие измерения применяется не ко всем случаям сравнения, а только к тем, в которых сравнение основывается на экспериментальном определении величины, т. е. операция измерения является физическим экспериментом. Количественное соотношение между величинами определяют при помощи устройств, называемых измерительными приборами. Измерения можно классифицировать с различных точек зрения. Прежде всего по способу получения числового значения измеряемой величины измерения делят на прямые, косвенные и совокупные.

Прямыми измерениями называют такие, при которых измеряемая величина сравнивается с единицей измерения непосредственно или при помощи прибора, предварительно проградуированного в данных единицах. Прямыми являются измерения тока амперметром, сопротивления при помощи мостовой схемы (где происходят сравнения измеряемого сопротивления с образцом, представляющим собой кратное значение единицы измерения, т. е. ома) и т. п.

Измерения называются косвенными, если измеряемая величина рассчитывается по результатам прямых измерений других величин, связанных с измеряемой величиной известной математической зависимостью. Например, косвенным является измерение тока по падению напряжения, создаваемому им на некотором сопротивлении (широко распространенный метод измерения слабых токов), так как измеряют при этом напряжение и сопротивление, а ток определяют расчетом по закону Ома $I = U/R$. Косвенным является и измерение сопротивления по методу амперметра — вольтметра. Прибор, в основе которого лежит косвенный вид измерений, может быть градуирован в единицах измеряемой величины. Действительно, если при упомянутом косвенном методе измерения тока используют всегда одно и то же сопротивление или их набор, то шкалу прибора можно заранее градуировать в единицах тока. Косвенные измерения применяют в том случае, если данную величину невозможно измерить непосредственно путем прямого измерения, или тогда, когда косвенное измерение дает более точный результат. Например, косвенное измерение

слабого постоянного тока по методу заряда конденсатора дает более точный результат, чем прямое его измерение гальванометром.

Совокупные измерения состоят из ряда (совокупности) прямых измерений одной или нескольких однородных величин, причем каждое измерение отличается от другого разными условиями или разным сочетанием величин. Числовые значения измеряемых величин определяют совместным решением системы полученных уравнений. Примером может служить измерение температурного коэффициента сопротивления резистора, когда проводится серия измерений его сопротивления при разных температурах и значение коэффициента получают путем расчета.

По степени точности измерения делят на лабораторные и технические. При лабораторных измерениях учитывают погрешность измерения, а при технических принимают наперед определенную точность, достаточную для данных целей. В технической практике в основном имеют дело с прямыми измерениями. Их осуществляют либо методом непосредственной оценки, либо методами сравнения.

При методе непосредственной оценки о значении измеряемой величины судят по показанию прибора, заранее градуированного в установленных единицах, причем измеряется сразу вся величина. Мера не участвует явным образом в этом процессе. Этот метод наиболее распространен в технических измерениях. Он прост, но точность его не всегда удовлетворительна. Примером метода непосредственной оценки может служить измерение электрических величин показывающими приборами.

К методам сравнения относится большая группа измерений, в основе которых лежит непосредственное сравнение измеряемой величины с мерой. Это нулевой метод, дифференциальный метод и метод замещения.

При нулевом методе эффект действия измеряемой величины уравновешивают с помощью приборов сравнения эффектом действия меры (или другой величины, значение которой определяется мерой и точно известно), так что их суммарное действие равно нулю. Указатель прибора при этом не дает никакого отклонения. К нулевым относятся мостовой и компенсационный методы измерения. Их точность, ограничиваемая лишь чувствительностью нулевого указателя и точностью мер, может быть очень высокой. Точность указателя при этом не играет роли, поскольку его назначение заключается в том, чтобы свидетельствовать об отсутствии какого-либо эффекта, а не измерять его величину.

Большое достоинство нулевого метода заключается еще в том, что когда измерительное устройство уравновешено, ток через нулевой указатель не протекает и никакой мощности в его цепи не потребляется. Во многих же других случаях вопрос устранения влияния собственного потребления прибора на результат измерения представляет собой немаловажную проблему, усугубляемую тем, что, как правило, чем точнее прибор, тем больше расходуется энергии на отклонение и удержание его подвижной части.

В дифференциальном методе, так же как и в нулевом, сравнивают измеряемую величину с мерой или другой величиной, которая определяется мерой и точно известна. Однако в отличие от нулевого метода полного уравновешивания здесь не происходит, и разность между измеряемой величиной и мерой (или другой

известной величиной) определяют при помощи измерительного прибора (обычно показывающего). Грубо говоря, для нулевого метода нужна мера с переменным значением, а при дифференциальном методе обходятся мерой с постоянным значением. Таким образом, в дифференциальном методе сочетаются нулевой метод и метод непосредственной оценки. По точности он занимает промежуточное между ними положение. Чем меньше искомая и известная (образцовая) величины отличаются одна от другой, тем более точные результаты могут быть получены. Если, например, различие в значениях составляет 1% и эта разность измеряется подходящим по чувствительности прибором с погрешностью 10%, то погрешность измерения самой величины в целом составит всего 0,1%.

Сущность метода замещения заключается в том, что измеряемая величина замещается в измерительном приборе при установке известной величиной (обычно мерами) так, что никаких изменений в состоянии измерительного прибора или установки не происходит. Такой метод позволяет исключить влияние систематических погрешностей (погрешности градуировки выходного прибора, погрешности от паразитных параметров).

Пусть, например, необходимо измерить емкость некоторого конденсатора на высокой частоте. Можно собрать ламповый генератор, колебательным контуром в котором будет катушка известной индуктивности и измеряемый конденсатор. По измеренной частоте колебаний можно рассчитать емкость конденсатора, но в действительности будет найдена емкость не конденсатора, а колебательного контура, в которую входят также емкости катушки, лампы и монтажа. Если емкость конденсатора невелика, то погрешность измерения будет чрезмерной. Пусть теперь колебательный контур состоит из той же катушки и конденсатора переменной емкости. Заметим частоту генерации и подключим параллельно этому конденсатору измеряемый конденсатор. Из-за увеличения общей емкости контура частота колебаний генератора снизится, и для того, чтобы вернуть ее к исходному значению, емкость переменного конденсатора нужно уменьшить на величину измеряемой емкости. Если на лимбе переменного конденсатора нанести значение его емкости в зависимости от угла поворота ротора, то получится прибор для измерения емкостей конденсаторов методом замещения. Очевидно, что паразитные емкости в этом случае никакого влияния на точность результата не оказывают.

Предположим далее, что прибор, которым мы измеряем частоту колебаний, имеет систематическую погрешность, например завышает показания (вместо 1 *Мгц* показывает 1,5 *Мгц*). Легко видеть, что и это обстоятельство не играет роли, поскольку при помощи прибора мы отмечаем факт возвращения частоты к исходной величине, само значение которой, вообще говоря, безразлично.

Рассмотрим еще такой практический пример. Пусть мы имеем ламповый вольтметр постоянного тока с приведенной погрешностью ±5% и пределами измерений 0—3, 0—10, 0—30 и 0—100 *в*, которым измеряем напряжение некоторого источника. При прямом подключении к зажимам источника вольтметр показывает +35 *в* на шкале 0—100 *в*. Абсолютная погрешность показаний на этой шкале составляет $\pm 5 \cdot 100/100 = \pm 5$ *в*, и относительная погрешность измерения методом непосредственной оценки равна таким

образом $\pm 5 \cdot 100/35 = \pm 14,3\%$. Возьмем какую-либо анодную батарею напряжением не менее 30 *в*. Подключим параллельно ей подходящий потенциометр и при помощи нашего же вольтметра установим между отрицательным полюсом батареи и движком потенциометра напряжение 30 *в*. Пользуясь пределом измерения 0—30 *в*, мы это напряжение установим с абсолютной $\pm 1,5$ *в* и относительной $\pm 5\%$ погрешностями. Затем переключим вольтметр на шкалу с конечным значением 10 *в* и измерим разность между измеряемым напряжением источника и напряжением на движке потенциометра. Пусть показание вольтметра будет $+5,9$ *в*. Стало быть, измеряемое напряжение источника равно $30 + 5,9 = 35,9$ *в*. Абсолютная погрешность показаний на шкале 10 *в* равна $\pm 5 \cdot 10/100 = 0,5$ *в*, а относительная погрешность составляет $\pm 0,5/5,9 \cdot 100 = 8,5\%$. В худшем случае погрешность установки напряжения на потенциометре и погрешность измерения разности сложатся, тогда предельная (наибольшая, какая возможна) абсолютная погрешность результата будет $\pm(1,5 + 0,5) = \pm 2$ *в*, а предельная относительная погрешность результата составит $\pm 2,0 \cdot 100/35,9 = 5,15\%$. Следовательно, переход к дифференциальному методу измерения позволил уменьшить погрешность чуть ли не втрое. Такой же результат при измерении методом непосредственной оценки мы получили бы только в том случае, если бы наш вольтметр имел приведенную погрешность $\pm 2\%$. В этом примере мы сами изготовили меру, установив ее значение при помощи вольтметра, и воспользовались тем обстоятельством, что это значение можно было установить с наивысшей для данного прибора относительной точностью в конце шкалы, а абсолютная погрешность измерения разности мала, так как она измеряется на более чувствительной шкале.

2. Средства измерений и классификация приборов

Вся сумма технических средств, используемых непосредственно при измерениях, называется измерительной аппаратурой. По характеру участия в процессе измерения ее делят на три группы: меры, измерительные приборы и измерительные приспособления. Мерами называют тела, вещества и устройства, служащие для конкретного воспроизведения единицы измерения. Измерительные приборы — устройства, предназначенные для прямого или косвенного сравнения измеряемой величины с мерой. К измерительным приспособлениям относят вспомогательные средства, которые облегчают, ускоряют процесс измерения или позволяют получить более точный отсчет (усилители, источники питания, оптические системы). Совокупность мер, измерительных приборов и измерительных приспособлений, объединенных единой схемой или методом измерения, образует измерительную установку.

Процесс измерения довольно редко осуществляют путем непосредственного сравнения величины с мерой, как, например, в мостовом методе измерения сопротивления. Кроме того, единицы измерения некоторых величин, в частности тока, по своей природе не могут иметь вещественного образца, т. е. меры (эти единицы воспроизводят при помощи особых эталонных измерительных установок, например, для воспроизведения ампера служат так

называемые токовые весы). Поэтому приборы предварительно градуируют путем прямого или косвенного сравнения с мерами и результат этого сравнения фиксируют на отсчетном приспособлении (наносят шкалу). При этом мера участвует в измерении косвенным образом.

Меры электрических величин бывают с постоянным и переменным значениями. Меры с постоянным значением воспроизводят единицу измерения, ее кратное или дробное значение. Таковы, например, катушки сопротивления, нормальный гальванический элемент и т. п. Из этих мер образуют наборы и магазины. Если каждая из мер применяется отдельно и независимо от других, то их совокупность называется набором, а если меры соединены в одно целое, то они представляют собой магазин мер. Набором мер является равновес, а магазином мер — магазин сопротивлений или емкостей. Меры с переменным значением воспроизводят любое значение единицы между определенными пределами. Примером может служить измерительный конденсатор переменной емкости.

С точки зрения роли и назначения мер и измерительных приборов они делятся на две категории: образцовых мер и измерительных приборов и рабочих мер и измерительных приборов.

Образцовые меры и измерительные приборы предназначены для воспроизведения и хранения единиц измерений или для поверки и градуировки различных мер и измерительных приборов. Образцовые меры и измерительные приборы, служащие для осуществления и хранения единиц измерения с наивысшей достижимой при данном состоянии техники точностью, называют эталонами.

Рабочими мерами и измерительными приборами называются те, которые предназначены для практических целей измерения. Они в свою очередь подразделяются на лабораторные и технические. К лабораторным мерам и измерительным приборам относятся меры и приборы, при применении которых производят учет точности измерения. Они снабжаются таблицами или формулами поправок к их значениям или показаниям в зависимости от окружающих условий (температуры, давления, влажности, угла наклона, магнитного поля и др.). Как правило, эти меры и приборы по степени точности стоят выше технических. К техническим мерам и измерительным приборам относят такие, при применении которых принимается наперед установленная (техническими условиями или государственными стандартами) точность измерения. Эти меры и приборы характеризуются простотой обращения с ними. В результат измерения никаких поправок не вносится, и он считается «технически» точным. Технические приборы поверяют в установленные сроки по образцовым мерам и приборам.

В описаниях радиолюбительской измерительной аппаратуры нередко рабочие меры ошибочно называют эталонными: «эталонный резистор», «эталонный конденсатор» и т. п. Между тем следует говорить: «образцовый резистор» или «производится сравнение с измерительной катушкой электрического сопротивления R» или «рабочей мерой сопротивления является резистор R».

Мера имеет номинальное значение, указанное на ней или в технических условиях, и действительное значение, определяемое при помощи образцовых мер или приборов высшего разряда.

Разность между этими значениями называется погрешностью меры. Погрешность, взятая с обратным знаком, т. е. разность между действительным и номинальным значением меры, называется поправкой — величиной, которую нужно алгебраически прибавить к номинальному значению меры, чтобы получить ее действительное значение.

Измерительные приборы делятся на две большие группы: приборы сравнения (компарирующие) и приборы непосредственной оценки (с непосредственным отсчетом). Первые служат для сравнения измеряемой величины с мерами, которые часто бывают вмонтированы в прибор. Приборами сравнения являются электрические мосты и потенциометры. Сами по себе (без мер) они не могут выполнять измерения. К приборам непосредственной оценки относят приборы, показания которых отсчитывают непосредственно по отсчетному механизму (шкале, цифровому табло и т. п.). В эту, самую многочисленную, группу входят стрелочные приборы, электросчетчики и ряд приборов с цифровым отсчетом.

По характеру получения измеряемой величины приборы непосредственной оценки разделяют на показывающие приборы, которые дают значение измеряемой величины, соответствующее моменту получения отсчета (амперметры, вольтметры и т. п.), интегрирующие приборы, показывающие суммарное значение измеряемой величины за время измерения (электросчетчики), логометры, которые измеряют отношение двух величин (мегометры, фазометры и др.).

По способу получения отсчета показывающие приборы делятся на приборы с визуальным отсчетом и самопишущие (регистрирующие) приборы. Последние могут иметь также и визуальный отсчет, но могут быть и бесшкальными, т. е. лишенными отсчетного приспособления. Часто показывающими называют только приборы с визуальным отсчетом.

Электроизмерительные приборы предназначены в основном для измерений в электрических цепях и установках постоянного тока и тока промышленной частоты. К ним относятся амперметры, вольтметры, ваттметры, фазометры, частотомеры и др. Приборы, предназначенные для измерения в радиоцепях и радиоаппаратуре, называют радиоизмерительными. Надо сказать, что деление это достаточно условно. Для многих приборов трудно указать четкие признаки, свидетельствующие об их принадлежности к одной из этих двух групп, так как в электроизмерительную технику все шире проникают электронные приборы, применявшиеся раньше только в радиотехнике, а измерения режимов радиоустройств и параметров их цепей часто мало чем отличаются от измерений в обычных электрических цепях.

Внеклассные измерительные приборы, у которых погрешность измерения больше предусмотренной стандартом, называют индикаторами. В радиоизмерительной аппаратуре индикаторным называют показывающий прибор, включенный в выходную цепь устройства. Обычно это малогабаритный микроамперметр магнитоэлектрической системы, класса 1, класса 1,5 или класса 2,5. Шкалу его, как правило, градуируют в единицах измеряемой величины. Приборы, показывающие лишь наличие измеряемой величины или ее признак, являются указателями (гальванометры, фазоуказатели).

По форме корпусов приборы делят на щитовые и переносные. По роду тока различают приборы постоянного, переменного однофазного и трехфазного тока.

Ряд приборов требует для получения отсчета перемещения подвижных частей (движка потенциометра, ротора конденсатора). Такие приборы называют измерительными приборами с наводкой или с управляемым отсчетом. Наводка может осуществляться как вручную, так и автоматически.

Измерительные приборы, которые имеют приспособления для сигнализации некоторых значений измеряемой величины, например, ее наибольшего значения, называются сигнализирующими. Приборы, у которых имеется устройство для регулирования процесса по определенным значениям измеряемой величины, называются регулирующими. Автоматизированные установки для контроля производства носят название приборов автоматического контроля.

В приборах для измерения физических величин часто отсчетное или регистрирующее устройство конструктивно оформляется отдельно от чувствительного элемента (датчика). Тогда это устройство называется вторичным прибором. Например, при измерении температуры термопарой вторичным прибором может быть самопишущий потенциометр или стрелочный милливольтметр.

3. Правила выполнения измерений

Надо пользоваться только вполне исправными приборами, показания которых заслуживают полного доверия. Желательно иметь на каждый прибор формуляр, куда следует заносить результаты поверки и итоги эксплуатации прибора.

При измерениях приборы располагают так, чтобы они не мешали один другому и чтобы было удобно снимать отсчеты с каждого из них. Шкалы должны быть хорошо освещены. Нельзя ставить приборы на край стола, так как можно их случайно столкнуть. По той же причине лучше ничего не подкладывать под приборы (книги, например). Соскользнув с подставки, прибор получит удар. Этот удар или возможное касание зажимом упавшего прибора других цепей могут испортить прибор. Соединения следует выполнять так, чтобы полностью исключить возможность несчастных случаев. Рядом с переключателями пределов измерения, например, не должны проходить провода высокого напряжения. Место измерения нужно содержать в чистоте.

Сначала рекомендуется составить схему измерений, выяснить номенклатуру измерительной аппаратуры, продумать ее размещение и схему электрических соединений, определить порядок действия. Торопливые, кое-как выполненные измерения имеют мало цены, потому что в конце работы, обнаружив ошибку, нельзя будет восстановить условия измерений и найти тот этап работы, на котором эта ошибка (или неясность результата) скорее всего возникла. И тогда придется начинать все сначала.

Измерение или серию измерений выполняют за один прием, с начала и до конца. Если прервать серию измерений и доделывать их спустя некоторое время, то к этому времени условия могут измениться и данные не будут «стыковаться». Например, если снять

часть характеристик лампы или транзистора в один день, а часть в другой, они не составят единого семейства. Если все же приходится прерывать измерение, то лучше всего в следующий раз проделать их сначала. Только в том случае, когда несколько последних результатов предыдущей серии измерений совпадут полностью с первыми результатами при продолжении измерений, можно начинать их не сначала. При получении сомнительных результатов измерения надо их повторить.

Полезно составлять протокол измерений. В нем указывают, что измерялось и с какой целью, метод измерения, схему измерения, наименование приборов и их номера, дату и время измерения. Отсчеты сводят в таблицы и при необходимости по ним вычерчивают графики. Отсчеты записывают в первой колонке без пересчета их в показания, которые пишут в третьей колонке (во второй указывают цену деления или постоянную прибора для пересчета). Пересчет в показания производят после, так как, если их пересчитывать на ходу в уме и писать сразу показания, то легко можно ошибиться и впоследствии ошибку будет трудно обнаружить. При ошибочной записи отсчета правильный отсчет надо написать сверху неправильного, зачеркнув последний так, чтобы его можно было прочитать. Это поможет восстановить правильность результата, когда в него уже вошел и неправильный отсчет.

Необходимые вычисления (например, при косвенных измерениях) лучше делать тут же, не откладывая, иначе какая-нибудь неясность или сомнение в отдельном отсчете или измерении может вызвать необходимость повторить их, а это легко сделать, пока схема измерения еще не разобрана.

Обязательно нужно оценивать погрешности. Они покажут границы применимости результата и степень доверия к нему.

Следует принимать все возможные меры для обеспечения безопасности работы. Корпусы приборов с питанием от электросети или включаемых в цепи высокого напряжения (выше 1 500 *в*) должны быть заземлены. У таких приборов полагается быть отдельному зажиму для заземления корпуса. Все внешние элементы приборов и источников электропитания, находящихся под напряжением выше 36 *в* по отношению к корпусу, должны иметь защиту от случайных прикосновений во время нормального действия прибора. Концы проводов, которыми прибор присоединяется к цепи, должны быть также защищены (наконечник, втулка из изоляционного материала и т. п.). Изоляция проводов должна соответствовать возможному напряжению на них.

Если нужно что-то перепаять в испытуемом устройстве, то прежде следует выключить его питание.

При измерении высоких напряжений (в телевизорах, осциллографах и т. п.) лучше работать одной рукой, а вторую заложить за спину. Под ногами необходимо иметь резиновый коврик. Нельзя при измерениях касаться какой-либо частью тела заземленных предметов (например, опираться другой рукой на корпус прибора). Рекомендуется периодически проверять изоляцию приборов и паяльника.

И еще несколько советов.

Используя впервые прибор, внимательно ознакомьтесь с инструкцией к нему. Если прибор имеет наружный шунт или добавочное сопротивление либо включается через трансформатор,

проверьте совпадение номеров прибора и вспомогательной части. Вторичные обмотки трансформаторов напряжения и тока должны быть заземлены. Размыкать вторичную обмотку трансформатора тока под нагрузкой нельзя (трансформатор пробьется). При необходимости сменить амперметр во вторичной цепи под нагрузкой или отключить его, вторичную обмотку трансформатора тока нужно замкнуть накоротко.

Многопредельный прибор включают в цепь всегда на наименее чувствительном пределе измерения. Часто случается, что фактическое значение измеряемой величины оказывается больше, чем ожидалось, или же перепутана полярность включения. Выполнение данного правила сохранит прибор от больших перегрузок.

Для быстрой проверки полярности включения прибора полезно запомнить, что в приборах постоянного тока отрицательный зажим расположен слева или снизу, если смотреть на прибор со стороны шкалы.

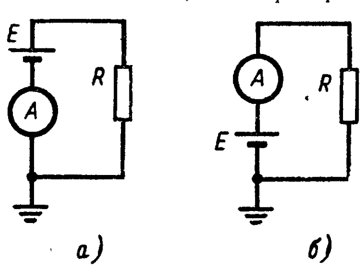


Рис. 1. Включение амперметра в электрическую цепь.

а — правильное; *б* — неправильное.

Неэкранированные приборы не рекомендуется располагать вплотную друг к другу, так как один прибор может влиять на магнитное поле другого. Не рекомендуется также располагать их рядом с большими массами железа и силовыми кабелями.

Микроамперметры и милли-амперметры нужно включать в ту часть цепи, которая заземляется (рис. 1). Соединительный провод надо сначала присоединить к вольтметру, а уже потом к источнику измеряемого напряжения. Если поступать наоборот, то присоединять к вольтметру придется провод, находящийся под напряжением, а это может быть опасно.

Если прибор был перегружен или получил удар, то следует сразу же проверить хотя бы одну точку его шкалы.

При измерениях нужно стремиться к тому, чтобы отсчет располагался во второй половине шкалы.

Стекло прибора в процессе работы протирают влажной тряпкой во избежание наведения электростатических зарядов, могущих повлиять на показания.

Приборы необходимо беречь от сырости и хранить их в футлярах. Приборы, снабженные арретиром, хранят в арретированном положении, а не имеющие арретира, — с замкнутыми накоротко зажимами.

4. Сведения о приборах

Измерительные приборы делятся на электромеханические и электронные. К электромеханическим относятся приборы, в которых необходимая для отклонения подвижной части измерительного механизма мощность отбирается непосредственно от испы-

туемой цепи. В электронных приборах происходит предварительное усиление мощности, т. е. на отклонение подвижной части расходуется мощность вспомогательного источника энергии, а отбираемая от испытуемой цепи мощность лишь управляет ею при помощи электронных устройств, например усилителей.

Электромеханические приборы. Рассмотрим вначале электромеханические приборы. Более простые и дешевые, чем электронные, они нашли широкое применение при контроле режимов радиоустройств, снятии их характеристик и т. п. Наибольшее распространение получили показывающие приборы непосредственной оценки. Эти приборы состоят из измерительного механизма, измерительной цепи (или схемы) и отсчетного устройства.

Измерительный механизм является основой прибора. В нем электрическая величина преобразуется в механическое (обычно угловое) перемещение указателя, что требует затраты некоторого количества электромагнитной энергии. Измерительная цепь служит для преобразования измеряемой величины в другую, уже непосредственно воздействующую на измерительный механизм. Преобразование может носить как качественный, так и количественный характер. Преобразователи позволяют использовать один и тот же измерительный механизм при измерениях разнородных или меняющихся в самых широких пределах величин. Например, отклонение подвижной части измерительного механизма магнитоэлектрической системы происходит под воздействием протекающего через него тока, причем для данного механизма допустимые изменения тока лежат в определенных пределах. При помощи шунтов (преобразователей по количественному признаку) можно, не меняя измерительного механизма, измерить большие токи. Включенный в измерительную цепь термопреобразователь или мостиковый диодный детектор осуществляют качественное преобразование, позволяя использовать тот же самый механизм для измерения переменного тока.

По способу преобразования электромагнитной энергии в измерительном механизме в отклонение его подвижной части и по конструктивным особенностям различают следующие системы приборов: магнитоэлектрическую, электромагнитную, электродинамическую, электростатическую и ряд других. Некоторые системы получают наименование по виду преобразователя в измерительной цепи магнитоэлектрического механизма, например, выпрямительные (детекторные), термоэлектрические.

Отсчетные устройства приборов состоят из указателя, жестко связанного с подвижной частью, и неподвижной шкалы. Указатели бывают механические (стрелка) и световые. В приборах с механическим указателем шкала размещается обычно под стрелкой. У технических приборов стрелка большей частью копьевидная. Лабораторные приборы (а в последнее время и многие щитовые малогабаритные) снабжают зеркалом и стрелке придают ножевидную форму. У приборов со световым указателем шкала размещается так, чтобы световое пятно указателя падало на ее отметки. Используя многократные отражения пятна, повышают точность отсчета. Шкала градуируется либо в единицах измеряемой величины (именованная шкала), либо в делениях (неименованная шкала).

Корпус, зажимы, переключатели и т. п. относят к вспомогательным частям прибора. По конструкции корпуса приборы делят

на щитовые (стационарные) и переносные, а по размеру лицевой части — на миниатюрные, малогабаритные, среднего габарита и большого габарита. Радиолюбители чаще всего имеют дело со щитовыми малогабаритными приборами, размер лицевой части которых находится в пределах 50—100 *мм*.

С измерительными механизмами мы познакомимся на примере магнитоэлектрического измерительного механизма. Он самый распространенный. Большинство вольтметров и амперметров постоянного тока, а также почти все индикаторные приборы радиоустройств являются магнитоэлектрическими.

В магнитоэлектрических измерительных механизмах для отклонения подвижной части используется явление взаимодействия проводника при протекании через него тока с полем постоянного магнита. Известны механизмы с подвижной рамкой,

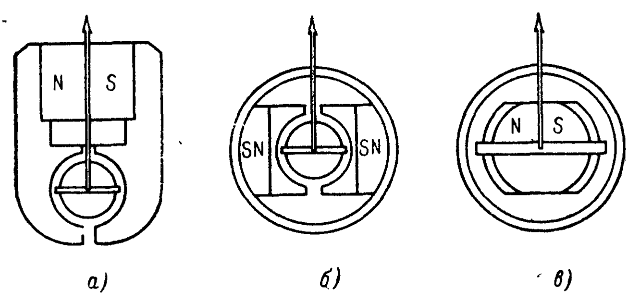


Рис. 2. Схематическое изображение магнитных систем магнитоэлектрических измерительных механизмов.

а — с внешним магнитом; *б* — с наружным магнитом броневого типа; *в* — с внутрирамочным магнитом.

в которых закреплен магнит, а вращается катушка с протекающим через нее измеряемым током, и механизмы с подвижным магнитом, в которых закреплена рамка, а перемещается магнит. Более распространены первые измерительные механизмы.

Механизм состоит из трех основных узлов: магнитной системы, подвижной части и обоймы.

Магнитные системы бывают с внешне- и внутрирамочным магнитами (рис. 2). Из систем с внешним магнитом наиболее рациональна система броневого типа, в которой магнит окружен ярмом из магнитомягкого материала. Ее применяют в высокочувствительных и высокоточных приборах. К недостаткам такой системы относятся большие габариты и высокая стоимость. Массовое же применение нашла небольшая по размерам и недорогая система с внутрирамочным магнитом.

В подвижную часть механизма входят рамка, стрелка (или зеркало в приборах со световым указателем), буксы с запрессованными кернами или держателями растяжек, противовесы (грузики) для уравновешивания подвижной части. Рамки имеют прямоугольную форму, они бывают каркасные или бескаркасные. Бескаркасные рамки наматывают на оправке и для прочности склеивают бакелитовым лаком. Буксу с запрессованными кернами наклеивают на рамку.

Обойма предназначена для крепления и центрирования подвижной части, крепления сердечника или магнита, подпятников, корректоров. На обойме устанавливают штифты для крепления шкалы прибора. Обоймы изготовляют штамповкой или литьем.

Измерительный механизм с внешним магнитом показан на рис. 3. До недавнего времени такие механизмы пользовались преимущественным распространением в щитовых приборах (ИТ, М24 и др.). В последнее время наиболее распространены магнитоэлектрические измерительные механизмы с внутрирамочным магнитом и креплением подвижной части на растяжках (рис. 4). В общих чертах мы о нем уже говорили, добавим лишь некоторые частности. Поскольку

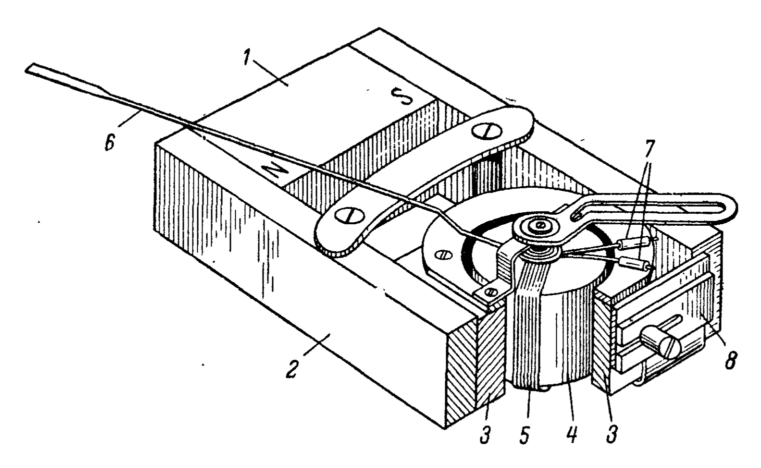


Рис. 3. Магнитоэлектрический измерительный механизм с внешним магнитом.

1 — постоянный магнит, *2* — магнитопровод; *3* — полюсные накладки; *4* — цилиндрический сердечник; *5* — рамка; *6* — стрелка; *7* — противовесы (грузики); *8* — магнитный шунт.

при внутрирамочном магните трудно получить равномерное поле в зазоре, на магнит надевают полюсные накладки из мягкой стали, при помощи которых и добиваются равномерности распределения индукции в рабочем зазоре.

Растяжки припаяны к амортизационным пружинам, создающим необходимое натяжение. Меняя это натяжение, можно изменять чувствительность механизма по току. Так и делают при ремонте механизма, но регулировка натяжения требует большой осторожности. Верхняя пружина укреплена на рычаге корректора, что дает возможность менять положение подвижной части (механическая установка нуля). Нижняя пружина электрически изолирована от обоймы, так как растяжки служат и токоподводящими проводниками. Для предохранения растяжек от обрыва ход подвижной части ограничивается пружинами (вилками). Вследствие этого приборы с растяжками могут противостоять повышенным механическим воздействиям (вибрациям, тряске, ударам).

Угол отклонения α подвижной части магнитоэлектрического механизма пропорционален площади рамки S, магнитной индукции в рабочем зазоре B, числу витков в рамке w и протекающему через рамку току I

$$\alpha = \frac{SBw}{W} I,$$

где W — удельный противодействующий момент, т. е. момент, создаваемый пружиной или растяжкой при ее закручивании на единицу угла.

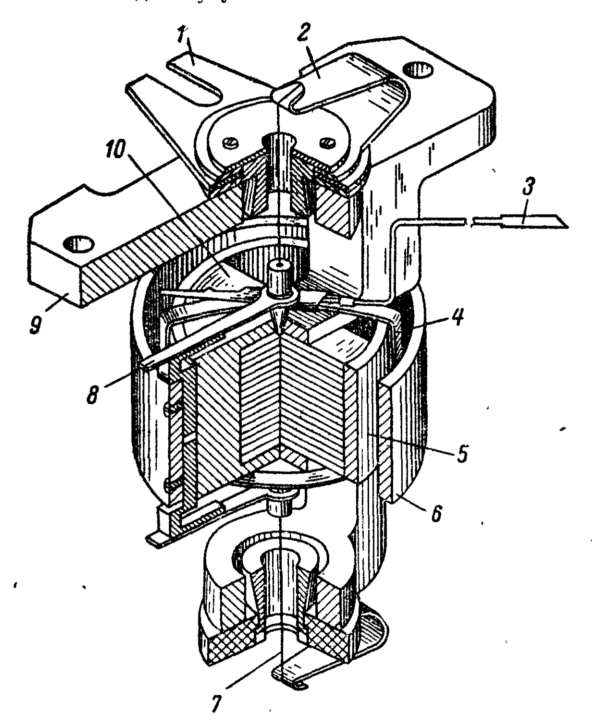


Рис. 4. Магнитоэлектрический измерительный механизм с внутрирамочным магнитом на растяжках.

1 — рычаг корректора; 2 — пружина; 3 — стрелка; 4 — рамка; 5 — полюсные накладки; 6 — ярмо; 7 — растяжка; 8 — ограничитель; 9 — обойма; 10 — магнит.

Шкала магнитоэлектрических приборов равномерна. Ток, необходимый для полного отклонения подвижной части, называется током потребления измерительного механизма (или собственным потреблением).

Момент успокоения в магнитоэлектрических приборах создается токами, индуцированными в каркасе рамки (или в добавочных корот-

козамкнутых витках при бескаркасной рамке) при ее движении, т. е. магнитоиндукционным способом.

О значении измеряемой величины судят по показанию прибора. Термин «показание» применим также к мерам с переменным значением, например, говорят о показании измерительного конденсатора переменной емкости. Показание прибора — это то числовое значение измеряемой величины в установленных единицах, которое непосредственно показывает прибор. Оно выводится из отсчета — числа, прочитанного по отсчетному приспособлению прибора.

Переход от отсчета к показанию прибора осуществляется при помощи постоянной прибора, цены деления шкалы, градуировочной кривой или градуировочной таблицы. Постоянная прибора есть число единиц измерения, на которое умножается отсчет для получения показания. Цена деления шкалы представляет собой значение измеряемой величины, соответствующее одному делению шкалы. Градуировочная кривая воспроизводит значения измеряемой величины, соответствующие различным точкам шкалы.

Постоянная прибора и цена деления шкалы практически равнозначны. Постоянной прибора оперируют при снятии показаний электросчетчиков, при конструировании и градуировке приборов, в гальванометрах. При эксплуатации показывающих приборов пользуются ценой деления шкалы.

Показание прибора, постоянная прибора и цена деления шкалы есть именованные числа, а отсчет является отвлеченным числом. В частном случае, когда постоянная прибора равна единице измерения, показание прибора и отсчет численно совпадают, что имеет место у большинства показывающих приборов. Например, у микроамперметра на 100 *мка* со шкалой, разделенной на 100 делений, цена деления равна дольной единице измерения, т. е. 1 *мка*. При отсчете 60 показание прибора равно 60 *мка*. Если шкала того же микроамперметра разделена на 50 делений, то показанию 60 *мка* соответствует отсчет 30. Таким образом, постоянная прибора в первом случае равна 1 *мка* на деление шкалы, а во втором — 2 *мка* на деление.

У гальванометров шкала отсчетного приспособления градуируется обычно в миллиметрах. Показание гальванометра равно числу миллиметров шкалы, умноженному на постоянную гальванометра по току, которая выражается в *а/мм/м*. Например, при отсчете 30 и постоянной по току $2 \cdot 10^{-8}$ *а/мм/м* показание гальванометра равно $60 \cdot 10^{-8}$ *а*. Имея в виду, что отсчетное приспособление устанавливают обычно на расстоянии 1 *м*, постоянную гальванометра по току выражают иногда в *а/мм*.

Размерность постоянной прибора зависит от рода измеряемой величины. Поэтому, говоря о постоянной прибора, упоминают род величины, например постоянная прибора по току. Заметим, что постоянная прибора по напряжению равна постоянной по току, умноженной на сопротивление прибора.

Часто, характеризуя прибор, пользуются понятием его чувствительности (при этом также указывают род величины). Чувствительностью прибора называется отношение линейного или углового перемещения указателя к изменению измеряемой величины, вызвавшему это перемещение. Для прибора с равномерной шкалой она равна отношению полного отклонения указателя к предельному значению измеряемой прибором величины. Например, чувствитель-

ность по току микроамперметра на 100 *мка* со шкалой, разделенной на 50 частей, будет 0,5 деления на 1 *мка*.

При нелинейной шкале чувствительность прибора переменна по шкале и определяется в данной точке как отношение малого перемещения указателя вблизи этой точки к приращению измеряемой величины.

Чувствительность прибора не следует смешивать с порогом чувствительности прибора, под которым понимают наименьшее значение измеряемой величины, способное вызвать заметное изменение показания прибора. Заметным можно считать отклонение указателя на одну пятую длины деления. Таким образом, порог чувствительности микроамперметра на 100 *мка* со шкалой, разделенной на 100 частей, можно полагать равным 0,2 *мка*. Если на измеряемую величину накладываются шумы, то за порог чувствительности можно принять значение измеряемой величины, превосходящее средний уровень шумов вдвое.

Из отсчетных приспособлений прибора важнейшими являются шкала и указатель.

Шкала есть совокупность отметок, которые расположены вдоль какой-либо линии и изображают ряд последовательных чисел, соответствующих значениям измеряемой величины Отметки имеют вид штрихов, черточек, точек и т. п. Промежуток между осями или центрами двух соседних отметок называется делением шкалы. Различают цену деления, если промежуток выражен в значениях измеряемой величины, и длину деления, если промежуток выражен в единицах длины (миллиметрах). При одинаковых делениях шкала равномерна. Отметка, соответствующая нулевому значению числового ряда шкалы, называется ее нулем (нулевая отметка). Шкала называется безнулевой при отсутствии нуля, односторонней при нуле в начале или конце шкалы и двусторонней при размещении отметок по обе стороны от нуля. Двусторонние шкалы бывают как симметричными, так и несимметричными. Те отметки, которые обозначены цифрами, указывающими число делений от нуля шкалы или непосредственно числовое значение измеряемой величины, называются числовыми отметками.

Началом шкалы считают крайнюю отметку, соответствующую наименьшему определяемому по данной шкале значению измеряемой величины, которая называется нижним пределом показаний прибора, а концом шкалы — крайнюю отметку, соответствующую наибольшему значению измеряемой величины, называемому верхним пределом показаний прибора. Эти пределы ограничивают диапазон показаний прибора. Часть шкалы, в пределах которой погрешности не превышают заданных (например, классом точности прибора) значений, называется рабочей частью шкалы. Она определяет рабочий диапазон измерений прибора, ограниченный нижним и верхним пределами измерения прибора.

Равномерная шкала считается рабочей по всей длине. В приборах с неравномерной шкалой длина рабочей части составляет не менее 85% всей шкалы, если рабочая часть ограничена с одной стороны, и 75%, если ограничена с двух сторон.

Указателем служит стрелка, нить, световой луч и т. п. Большей частью указатель перемещается вдоль неподвижной шкалы, но имеются приборы с неподвижным указателем и перемещающейся, обычно поворачивающейся шкалой.

Электронные приборы. Электромеханические приборы пригодны для измерения почти всех основных электрических величин (напряжения, тока, сопротивления, емкости, индуктивности, частоты, сдвига фаз и т. п.). Однако их частотный диапазон, гибкость применения, универсальность и ряд других свойств совершенно недостаточны для того, чтобы эти приборы можно было использовать для измерения в высокочастотных цепях. Поэтому большинство радиоизмерительных приборов являются электронными, включающими измерительную цепь, электронный преобразователь и выходной индикаторный прибор (как правило, магнитоэлектрической системы).

Быстродействие есть та особенность электронных приборов, которая принципиально отличает их от электромеханических. Частотный диапазон электронных приборов ограничивается сверху только конечностью времени пролета электронов в лампе или дрейфа носителей тока в базовой области транзистора и составляет сотни мегагерц.

В электронных приборах можно легко преобразовать одну электрическую величину в другую, удобную для измерений, например, напряженность поля в электрический ток.

Во многих случаях электронные приборы оказываются более чувствительными и надежными по сравнению с электромеханическими. Например, электронный вольтметр с таким же сопротивлением входа, что и электростатический вольтметр, чувствительней последнего в сотни и даже в тысячи раз и лишь немногим уступает ему в точности показаний. Кроме того, он и более прочен.

Универсальность электронных приборов проявляется в том, что один и тот же прибор с минимальными изменениями пригоден для измерения различных величин. Однако нужно отметить, что электронные приборы оказываются дороже электромеханических.

Общие технические требования к радиоизмерительным приборам изложены в ГОСТ 9763-61. Подробно некоторые электронные приборы будут описаны ниже.

Маркировка приборов и вспомогательных частей. На лицевой стороне приборы имеют следующие обозначения. Обозначение единицы измеряемой величины (например, A — ампер, V — вольт, Ω — ом, H — генри, F — фарада, Hz — герц, cos φ — коэффициент мощности и т. п.) или полное наименование прибора. Обозначение класса прибора, (на комбинированных приборах указывают классы точности для каждой измеряемой величины, если классы различны). Номер ГОСТ, по которому изготовлен прибор. Условное обозначение системы прибора (рис. 5). Условное обозначение рабочего положения прибора, если оно имеет значение. Товарный знак завода-изготовителя. Год выпуска и заводской номер.

Некоторые обозначения могут наноситься как на лицевой стороне, так и на корпусе прибора или у его зажимов. К ним относятся условное обозначение рода тока и числа фаз, частоты, если она отличается от 50 *гц*, заводское обозначение прибора и т. п. На приборах, при градуировке которых учтено сопротивление соединительных проводов, есть обозначение КП, говорящее о том, что прибор надо включать с калиброванными проводами (сопротивление 0,035 *ом*), или указано необходимое сопротивление соединительных проводов.

Приборы, включаемые через измерительные трансформаторы тока или напряжения, имеют обозначение коэффициента трансфор-

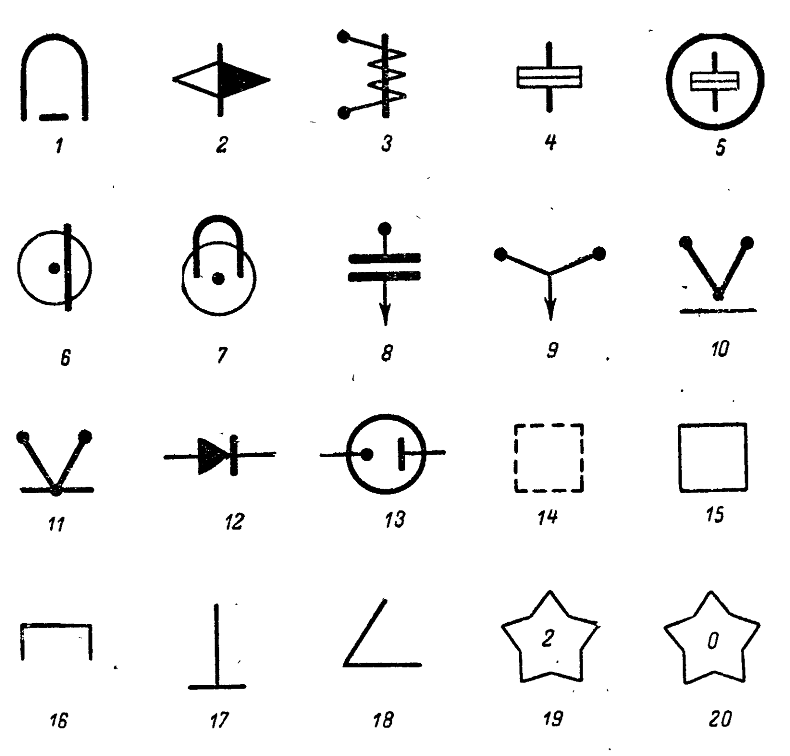


Рис. 5. Условные обозначения системы прибора, вида преобразователя защиты от внешних полей, рабочего положения, испытательного напряжения изоляции прибора.

1 — магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой; *2* — магнитоэлектрический прибор с подвижным магнитом; *3* — электромагнитный прибор; *4* — электродинамический прибор; *5* — ферродинамический прибор; *6* — индукционный прибор; *7* — магнитоиндукционный прибор; *8* — электростатический прибор; *9* — тепловой прибор (с нагреваемой проволокой); *10* — термопреобразователь изолированный; *11* — термопреобразователь неизолированный; *12* — полупроводниковый преобразователь; *13* — электронный преобразователь; *14* — электростатический экран; *15* — магнитный экран; *16* — горизонтальное положение шкалы; *17* — вертикальное положение шкалы; *18* — наклонное положение шкалы под определенным углом к горизонту (например, 60°); *19* — измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, например, 2 *кв*; *20* — прибор испытанию прочности изоляции не подлежит.

мации в виде надписей ТТ $\frac{I_1}{I_2}$ или ТН $\frac{V_1}{V_2}$ (в числителе указывается значение первичного тока в амперах или напряжения в вольтах, а в знаменателе значение вторичного тока или напряжения).

Приборы, включаемые через наружный шунт, имеют надпись НШ, а включаемые через добавочное сопротивление, — надпись ДС. Если прибор включается через добавочное устройство или вспомогательные части, то на прибор наносят заводское обозначение этой части, например ТП-Т102 (термопреобразователь).

На переносных приборах указывают собственное потребление энергии, выражая его падением напряжения при номинальном токе, током при номинальном напряжении, сопротивлением цепи или потребляемой мощностью.

5. Градуировка приборов и изготовление шкал

Градуировка измерительного прибора заключается в нанесении на основание шкалы отметок, соответствующих определенным значениям измеряемой величины. При имеющейся шкале градуировка сводится к приданию ее отметкам значений в установленных единицах измерения.

Для градуировки прибора собирают измерительную схему, которая обеспечивает плавную или ступенчатую регулировку измеряемой величины, постоянство ее значений, нужных для градуировки, и точность измерения. Действительные значения измеряемой величины определяют по образцовому прибору или при помощи специальных установок.

Градуировка может быть выполнена следующими различными способами.

1. В двух или трех точках основания шкалы наносят карандашом отметки положения конца стрелки, соответствующие определенным значениям измеряемой величины. По полученным точкам вычерчивают затем всю шкалу. Промежуточные отметки получают в результате деления расстояния между градуированными опорными точками в соответствии с характером шкалы.

Рассчитаем для примера логарифмическую шкалу по двум произвольно расположенным точкам. Пусть на шкале микроамперметра с пределами измерений 1—100 *мка* нанесены опорные точки 2 и 15 *мка* и расстояние между ними по дуге шкалы оказалось равным l *мм*. Найдем вначале положение отметки 10 *мка*. Так как $\log 10=1,0$ а $\log 2 = 0,3010$, то расстояние между отметками 2 и 10 *мка* содержит $\log 10 - \log 2 = 0,699$ условных единиц длины. Расстояние по шкале между отметками 10 и 50 *мка* содержит также $\log 50 - \log 10 = 1,699 - 1 = 0,699$ условных единиц длины, так что отметка 10 *мка* находится ровно посредине отметок 2 и 15 *мка*. Этот результат можно было сказать заранее, так как $10/2 = 50/10$. Если отношения чисел равны, то и логарифмы этих отношений равны и равны отрезки на логарифмической шкале между отметками, образующими равные отношения. Расстояние между отметками 4 и 2 *мка* равно расстоянию между отметками 8 и 4 *мка*. Эти расстояния содержат по $\log 2 = 0,301$ условных единиц длины, всего 0,602 единицы. Отрезок от 8 до 10 *мка* содержит $\log 10/8 = 0,0969$ единиц. Участок шкалы от отметки 2 *мка* до отметки

10 *мка* равен 4/2 и заключает в себе 0,602 + 0,0969 = 0,6989 единиц длины. Тогда отметка 3 *мка* будет находиться на расстоянии

$$\frac{l}{2} \cdot \frac{1}{0,6989} \left(\log 3 - \log 2\right) \approx 0,125l$$

от отметки 2 *мка* и т. д.

Так определяются все отметки шкалы. Легко видеть, что общая формула имеет вид:

$$x = l\,\frac{\log a_x - \log a_м}{\log a_к - \log a_н},$$

где x — расстояние между искомой отметкой a_x и отметкой $a_м$, которая известна и имеет меньшее значение (обычно $a_м = a_н$);

$a_н$ — первая известная отметка;

$a_к$ — конечная известная отметка в пределах одной-двух декад;

l — расстояние между отметками $a_к$ и $a_н$.

Разметка шкалы производится таким образом до получения всех отметок в пределах одной декады, поскольку остальные части шкалы повторяют размеченную.

2. На приборе наносят временную равномерную шкалу, состоящую из произвольных делений. Затем устанавливают ряд известных значений измеряемых величин и определяют соответствующие им отметки шкалы. По полученной таблице отсчетов вычерчивают постоянную шкалу, а временную стирают.

Если возможно, то устанавливают такие значения измеряемой величины, которые соответствуют выбранным наперед отметкам временной шкалы. Тогда на нее достаточно нанести только эти отметки.

3. Если на приборе есть постоянная шкала с равномерными делениями, например, у изготовленного лампового вольтметра с магнитоэлектрическим микроамперметром на выходе, то операция градуировки заключается в определении при помощи образцовых мер или измерительных приборов значений отметок шкалы в единицах измерения. Зависимость между отметками шкалы и единицами измерения представляется либо в виде таблицы, либо в виде графика.

Удобны графики с масштабными делениями, нанесенными по обе стороны самой градуировочной кривой, а не по осям координат (рис. 6). При пользовании таким графиком с перенесенным масштабом уменьшается вероятность ошибок и ускоряется процесс перевода отсчета в показание.

Иногда регулировкой чувствительности прибора удается придать конечной отметке шкалы желаемое значение, что при равномерном характере шкалы делает градуировочную таблицу или график ненужными. Но если часть шкалы нелинейна (сжата в начале, например), то график нужен. Такой случай может встретиться при градуировке шкалы переменного тока лампового или детекторного вольтметра.

Графики строят обычно на миллиметровой бумаге. Цену делений сетки (масштаб графика) по горизонтальной и вертикальной осям нужно выбирать такими, чтобы погрешность отсчета по графику была в 4—5 раз меньше основной погрешности прибора.

Допустим, мы можем определить положение точки на графике с погрешностью 0,5 *мм*. Следовательно, основной погрешности прибора соответствует отрезок в 2,5 *мм*. Если прибор является микроамперметром класса 1,5 с конечным значением шкалы 100 *мка*, то его основная погрешность 1,5 *мка*. Таким образом, отрезок в 2,5 *мм* должен изображать 1,5 *мка*, т. е. масштаб 1,5/2,5 = = 3/5 *мка/мм*. Такой масштаб неудобен для работы с графиком, поэтому округлим его до ближайшего удобного (в сторону укрупнения) 1/2 *мка/мм*.

4. В заводских условиях приборы градуируют обычно подбором готовых типовых печатных шкал. При этом если показания выходят за допустимую погрешность, то производят регулировку чувствительности прибора.

Отметки при градуировке наносят мягким и остроотточенным карандашом без нажима. Они должны иметь вид черточек, более

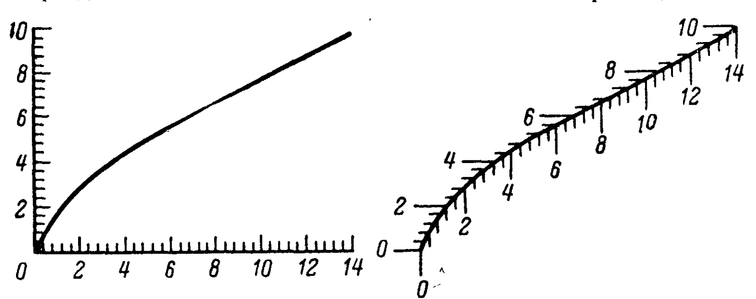


Рис. 6. Графики градуировки измерительного прибора. Слева обычный график, справа — график с перенесенным масштабом.

тонких, чем конец стрелки. При нанесении отметок кисть руки располагают на корпусе прибора выше шкалы, карандаш держат в направлении стрелки тупым концом от себя и наклонно к плоскости шкалы. Острие карандаша ставят под конец стрелки (не касаясь ее) и проводят черточку, которая является как бы продолжением стрелки. Для предотвращения колебаний стрелки от дыхания градуировщика шкалу прикрывают стеклом, придерживая его другой рукой в наклонном положении, чтобы оно не касалось карандаша.

Радиолюбителям приходится вычерчивать новые шкалы в основном для щитовых малогабаритных электроизмерительных приборов, используемых в качестве индикаторных в выходных цепях радиоизмерительной аппаратуры собственного изготовления. Это, как правило, магнитоэлектрические микроамперметры и миллиамперметры типов М24, М265, М4200, М49 и др. Необходимость в этом возникает в том случае, если шкала радиоизмерительного прибора получается неравномерной, или тогда, когда прибор должен иметь несколько шкал с несовпадающими отметками. По сути дела, здесь мы встречаемся с переградуировкой индикаторного прибора, что конечно, упрощает задачу.

В этом случае после окончания монтажа и первой проверки радиоизмерительного прибора собирают схему для его градуировки. Вначале устанавливают такое значение измеряемой величины,

которое соответствует верхнему пределу измерения прибора (или конечному значению градуируемой шкалы, если прибор многошкальный), и регулируют чувствительность так, чтобы стрелка индикатора стала на конечную отметку его шкалы (отклонилась на всю шкалу). В этом положении орган регулировки чувствительности прибора фиксируют. Затем определяют значения нескольких промежуточных отметок шкалы индикатора в установленных единицах, т. е. производят градуировку прибора по третьему из описанных выше способов. Число градуируемых точек выбирают достаточным для последующей разметки шкалы с учетом ее характера.

Для устранения влияния трения значение каждой отметки индикатора принимается равным полусумме показаний образцового прибора при подводе стрелки индикатора к данной отметке его шкалы один раз от нуля, а другой — приблизительно от конечной отметки. У хороших индикаторов разницу в показаниях трудно уловить, но радиолюбителю подчас приходится применять и индикаторы с заметной вариацией. Если прибор многошкальный, то составляют столько градуировочных таблиц, сколько у него шкал, чтобы потом вычертить все шкалы сразу.

После этого циферблат (шкалу с подшкальником) индикатора снимают. Переградуировку его производят при помощи вынесенной вспомогательной шкалы. Для этого в листе ватмана (формата A_1 или A_2) или другой чертежной бумаги с гладкой поверхностью вырезают отверстие, по форме и размеру совпадающее с циферблатом. Последний предварительно накладывают на лист и обводят по контуру острым карандашом. Этот лист укрепляют кнопками на чертежной доске или столе, и циферблат (шкалой вверх) помещают в вырезанное отверстие, которое фиксирует его положение. Поверхность циферблата оказывается при этом примерно на одном уровне с поверхностью листа.

Далее находят центр дуги шкалы на пересечении прямых, являющихся продолжениями крайних отметок шкалы индикатора. Если центр найден правильно, то через него пройдет продолжение и любой другой отметки, в частности средней, чем и проверяется правильность центра.

На том же листе ватмана строят вспомогательную шкалу, которая подобна, но гораздо крупнее нужной основной шкалы. Из центра проводят дугу значительно большего радиуса и выносят на нее градуированные точки шкалы индикатора, включая обе крайние отметки. Для этого из центра дуги проводят прямые через упомянутые отметки (точки) до пересечения с большой дугой. Затем вспомогательную шкалу размечают полностью и приступают к изготовлению основной шкалы, что может быть сделано следующими способами: 1) на циферблат наклеивают чистую белую бумагу, на которую переносят отметки со вспомогательной шкалы; 2) отметки переносят непосредственно на циферблат, покрытый предварительно шкальной эмалью; 3) вспомогательную шкалу оформляют полностью, фотографируют, печатают в нужном масштабе и наклеивают на циферблат индикатора. В любом случае используют обратную сторону циферблата, что позволяет при необходимости вернуть индикатору первоначальный вид.

При изготовлении шкалы по первому способу бумагу вырезают по форме циферблата с небольшим припуском. Поверхность циферблата слегка процарапывают для лучшего закрепления бумаги,

обезжиривают (щелочью, нашатырным спиртом или бензином Б-70) и промывают водой. После того как она просохнет, наносят тонкий слой клея БФ-2, нитроклея или шеллака. При толстом слое клея он может пропитать в отдельных местах бумагу и на шкале появятся пятна. Бумагу накладывают на циферблат и через другой лист бумаги проглаживают теплым утюгом. Выступающие края бумаги осторожно опиливают напильником, который ведут только от бумаги к циферблату с очень легким нажимом, чтобы не опилить циферблат. Напильник должен составлять с циферблатом угол 60—70°. Отверстие для крепления прокладывают и опиливают круглым надфилем. Если на бумаге заметен ворс, то его обжигают, проводя циферблат с бумагой над пламенем так быстро, чтобы не загорелась и не пожелтела сама бумага.

Подготовленный циферблат вновь, но уже обратной стороной, вкладывают в отверстие в листе ватмана и переносят отметки со вспомогательной шкалы вначале карандашом. Из центра проводят дугу того же радиуса, что и на прежней шкале индикатора. Соединяя линейкой центр дуги последовательно со всеми отметками вспомогательной шкалы, переносят их на основную. Карандашом без нажима наносят знаки. Пока все делается карандашом, можно вносить исправления и улучшения, и когда новый циферблат приобретает хороший вид, отметки и знаки обводят тушью (отметки — рейсфедером, по радиусам, т. е. перпендикулярно дуге, а знаки — рейсфедером или пером). Если на циферблате несколько шкал, то верхние или нижние концы отметок каждой шкалы соединяют дуговой линией. Если же шкала одна, то эта линия необязательна. Тогда проведенную при построении дугу не обводят тушью и после высыхания шкалы ее стирают.

При вычерчивании шкалы рекомендуется соблюдать требование к толщине и длине отметок и к длине деления шкалы (ГОСТ 5365-57). Наименьшая длина деления шкалы должна быть не менее 0,5 расстояния по шкале, соответствующего абсолютной величине допустимой погрешности прибора. Наибольшая длина деления шкалы в приборах класса 1,0 и меньшей точности при равномерной шкале должна быть не более трехкратного расстояния, соответствующего основной погрешности прибора, а при неравномерной шкале — не более пятикратного. Требование в отношении наибольшей длины деления не распространяется на неравномерные шкалы приборов, принцип работы которых не позволяет выполнить это условие.

Единицу измерения или наименование прибора указывают в центральной части поля циферблата или у крайних отметок шкалы. Для чисел отсчета, условных обозначений и надписей должны применяться шрифты и знаки по ГОСТ 2930-45 и ГОСТ 1845-59.

Новый циферблат для защиты покрывают каким-нибудь прозрачным и бесцветным лаком (например, цапон-лаком).

Чаще всего новую шкалу располагают на обратной стороне циферблата. При этом очень важно, чтобы при переворачивании циферблата центры отверстий для его крепления не смещались. Если центры смещаются, то циферблат соответственно сдвигают. Несимметричность самого циферблата роли не играет.

После установки циферблата на место проверяют, не задевает ли стрелка за бумагу, и при необходимости стрелку слегка отгибают.

И, наконец, прибор поверяют. Вообще-то говоря, поверять прибор следует дважды, причем первый раз тогда, когда основная шкала размечена еще карандашом и возможные неточности можно исправить. Однако при тщательном соблюдении изложенного порядка действий шкала получается практически безошибочной, не требующей промежуточной поверки.

Второй способ изготовления шкалы (нанесение шкалы непосредственно на циферблат) в любительских условиях малопрактичен и более сложен. Ведь на покрытие одного циферблата требуется совсем немного грунта и эмали, а приходится приобретать их по целой банке. Зато такая шкала имеет отличный внешний вид.

При этом способе обратную сторону циферблата индикатора или же заготовки нового циферблата обезжиривают, промывают водой и покрывают грунтом № 138 (продается в автомагазинах и магазинах Главхимсбыта). Грунтуют дважды или трижды, каждый раз обрабатывая поверхность наждачной шкуркой, сначала крупной, а потом мелкой. Грунт не только обеспечивает прочность эмалевого покрытия, но и позволяет заполнить все мелкие неровности в заготовке (крупные заделывают нитрошпаклевкой). Чтобы видеть, все ли и хорошо они заделаны, поступают так. Наждачную шкурку натягивают на деревянный брусок и закрепляют гвоздиками на боковых его сторонах, причем между шкуркой и нижней стороной бруска прокладывают сукно или немного ваты. Брусок должен быть раза в два-три длиннее циферблата. Этим бруском обрабатывают загрунтованную заготовку в одном, а затем в перпендикулярном ему направлении. Если после этого посмотреть на заготовку под некоторым углом, то будут ясно видны имеющиеся еще впадины. Обработку ведут до тех пор, пока поверхность станет совершенно ровной и однотонной.

Затем из пульверизатора наносят тонкий слой шкальной эмали 20-13 или белой эмали № 380 либо аналогичной краски (белая нитроэмаль НЦ-25, например). Шкальная эмаль хороша тем, что она не дает бликов. Просохший слой обрабатывают шкуркой и наносят еще два слоя эмали, давая каждый раз предыдущему слою просохнуть. Отметки и знаки наносят черной нитроэмалью НЦ-25 при помощи рейсфедера.

Третий способ изготовления шкалы путем фотографирования имеет свои достоинства. Шкала на фотобумаге получается приятной на вид и не желтеет со временем, если отпечаток был хорошо промыт. Размер вспомогательной шкалы позволяет наносить знаки, пользуясь шаблоном или же линейкой и рейсфедером, поэтому шкала будет выглядеть красиво даже при плохом почерке градуировщика. Однако, нанося на вспомогательной шкале отметки и знаки, нужно помнить, что длина вспомогательной шкалы, а следовательно, и ее элементов больше длины основной шкалы во столько раз, во сколько радиус большой дуги больше радиуса шкалы индикатора, т. е. расстояния от центра дуги до нижних концов ее отметок.

При этом способе важно получить правильный размер шкалы на отпечатке. Для этого в рамку для фотопечати кладут лист фотобумаги подложкой вверх и при обычном освещении наносят на ней две линии, расстояние между которыми равно расстоянию (по прямой) между нижними концами крайних отметок шкалы индикатора. В соответствии с этим регулируют масштаб изображения шкалы, даваемого увеличителем. Листы фотобумаги не должны быть поко-

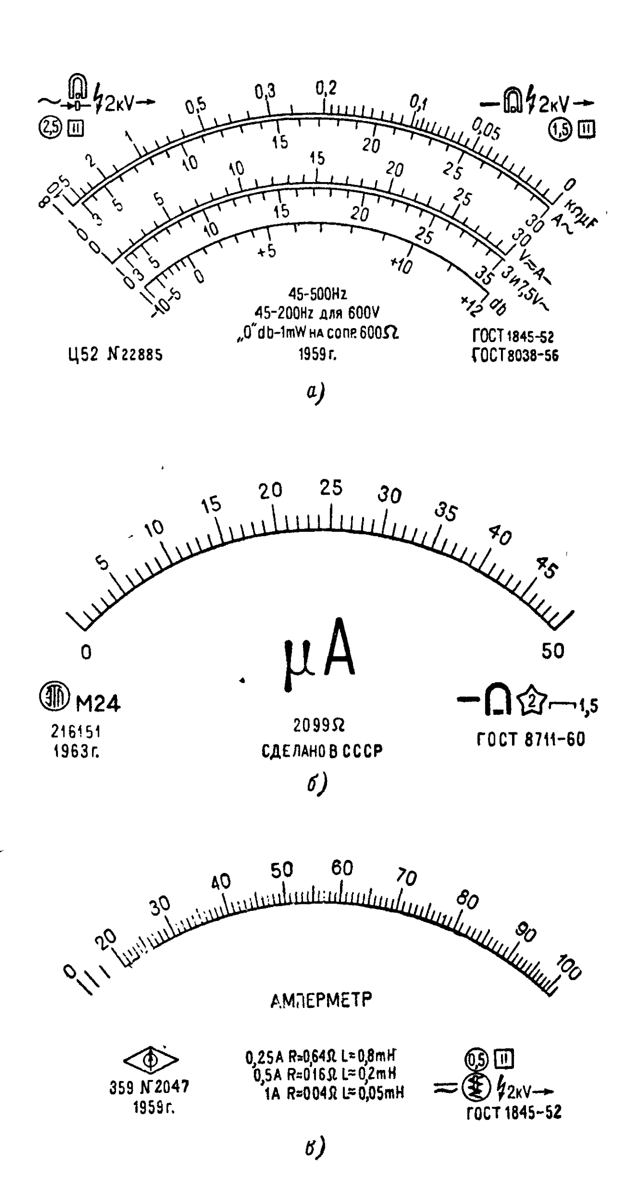


Рис. 7. Образцы шкал измерительных приборов.

а — комбинированного прибора выпрямительной системы; *б* — щитового малогабарнтного микроамперметра магнитоэлектрической системы; *в* — переносного амперметра электромагнитной системы.

робленными. Подготовку поверхности циферблата и приклеивание отпечатка производят аналогично тому, как было указано выше.

Если прибор, предназначенный для использования в качестве индикаторного, не имеет шкалы или она по каким-либо причинам непригодна, то порядок изготовления шкалы несколько иной. Вначале на циферблат наклеивают бумагу, затем прибор градуируют по первому или второму из рассмотренных способов. По полученным отметкам находят центр дуги шкалы, после чего вычерчивают шкалу, вынося ее разметку на вспомогательную шкалу или же размечая сразу циферблат.

Образцы шкал приборов показаны на рис. 7. В заключение рассмотрим кратко юстировку, тарировку и калибровку измерительных приборов.

Юстировка (выверка) мер и измерительных приборов заключается в приведении мер и измерительных приборов в рабочее состояние, обеспечивающее надлежащую их правильность и надежность действия (регулировка строго горизонтального положения некоторых приборов, снабженных для этого регулирующими винтами и уровнем, ориентация прибора в направлении магнитного поля и т. п.).

Тарировкой называют иногда третий способ градуировки (см. стр. 22), иногда определение цены деления шкалы и т. п. Точного определения этот термин не имеет и употреблять его не следует.

Калибровка измерительного прибора представляет собой операцию определения погрешностей значения шкалы, осуществляемую путем сравнения друг с другом в различных сочетаниях отдельных участков шкалы. Грубо говоря, калибровка заключается в определении равномерности нанесения отметок шкалы (итог вычерчивания шкалы). Эта операция отлична от градуировки.

В последнее время под калибровкой чаще всего понимают операцию проверки правильности шкалы прибора непосредственно перед измерением путем сравнения показания в какой-либо одной точке шкалы с мерой и приведения этого показания в соответствие с номинальным значением. Меры (контрольное напряжение, образцовое сопротивление и т. п.) зачастую встраиваются в прибор. Считается, что если одному и тому же контрольному сигналу соответствует одно и то же показание прибора, то градуировка его не нарушена и соответствует начальной.

6. Поверка приборов

Под поверкой понимают сравнение мер и показаний измерительных приборов с образцовыми мерами или показаниями образцовых измерительных приборов с целью определения погрешностей или поправок. К поверке в более широком смысле этого слова относят также определение соответствия различных параметров мер и приборов требованиям стандартов и технических условий. Итоги поверки позволяют установить пригодность поверяемых мер и измерительных приборов к дальнейшему использованию по назначению.

Поверке подлежат вновь изготовленные, выпущенные из ремонта, хранимые на складе и находящиеся в эксплуатации приборы. Необходимость периодической поверки приборов при их хранении и эксплуатации объясняется тем, что с течением времени приборы теряют свою точность из-за старения пружин и магнитов. В электронных приборах, кроме того, стареют и элементы схемы (рези-

сторы входных делителей, лампы и т. п.), окисляются контакты. Точность приборов страдает также от случайных ударов и толчков, от тряски при транспортировке. Перегрузки и броски тока при неправильном выборе предела измерения или полярности включения могут не только «сбить» нуль прибора, но и сместить стрелку относительно подвижной части и даже погнуть ее.

Порядок, объем и периодичность поверки различных категорий приборов устанавливаются инструкциями и методическими указаниями Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР и его институтов. Инструкции являются официальными изданиями, методические же указания носят рекомендательный характер.

Измерительную аппаратуру, имеющуюся в распоряжении радиолюбителей, можно разделить на две группы. К первой группе отнесем приборы, приобретенные в магазинах электротоваров и радиотоваров, магазинах учебно-наглядных пособий, а ко второй — приборы, изготовленные самостоятельно. Первые рекомендуется поверять в учреждениях Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, причем удобнее делать это через местные радиоклубы.

Самостоятельно изготовленные приборы поверяют в радиоклубе или дома, сличая их показания с показаниями прибора более высокого (в 3—5 раз) класса точности. По возможности следует придерживаться инструкций и методических указаний Комитета и его институтов, что обеспечит выполнение поверки наилучшим образом. Инструкции и методические указания, а также сборники по видам измерений регулярно публикуются Издательством стандартов.

Если следовать инструкциям затруднительно, то поверку можно производить упрощенными способами, исходя из имеющихся возможностей. Например, вольтметр можно поверить путем измерения э. д. с. гальванических окисно-ртутных элементов, мосты — измерением резисторов типа МВСГ и т. п.

При нормальных условиях эксплуатации радиоизмерительные приборы нужно поверять один раз в полтора-два года, а также сразу после ремонта, переделки и при сомнении в правильности показаний.

Радиолюбители часто приобретают приборы в отделах некондиционных радиотоваров, где эти приборы недороги. При этом важно уметь на глаз установить степень годности прибора и возможность его ремонта. Это позволит выбрать хороший экземпляр.

При внешнем осмотре прибора обращают внимание на сохранность кожуха, стекла, смотрят, не погнута ли стрелка. Проверяют действие корректора (устанавливает ли он стрелку на отметку механического нуля и в каких пределах смещает стрелку). Корректор должен перемещать указатель в каждую сторону от отметки механического нуля на 2—6% от длины шкалы.

Затем прибор берут в руки, быстро поворачивают его в плоскости шкалы в сторону конечной отметки и быстро же возвращают в исходное положение (желательно, чтобы оно было рабочим). Двигаясь по инерции вместе с подвижной частью, стрелка отклонится до конца шкалы, если повороты достаточно энергичны (но не резки!). При этом наблюдают, как стрелка возвращается к отметке механического нуля. Если она до него не доходит, то это свидетельствует о большом трении в опорах (грязь, ржавчина, перекос) или о том, что подвижная часть прибора задевает за неподвижную (чаще всего

стрелка задевает за шкалу или стекло). Если же стрелка находится в состоянии безразличного равновесия, т. е. остается примерно там, куда первоначально отклонилась, значит у прибора в месте пайки отскочила противодействующая пружина. Обычно при этом не действует и корректор. Во избежание недоразумений нужно помнить, что у одного класса приборов — флюксметров противодействующая пружина отсутствует. Неисправность успокоителя узнают по колебаниям стрелки вокруг нулевого положения свыше положенных максимальных 4 *сек*.

Чтобы убедиться, что электрическая цепь прибора в порядке (что нет обрыва в рамке и не нарушены контакты), зажимы прибора замыкают накоротко и быстро отклоняют его в плоскости шкалы. При исправной цепи стрелка отклоняется на гораздо меньший угол, чем при разомкнутых зажимах, и возвращается к нулевому положению медленнее, так как в замкнутой цепи рамки при ее перемещении индуцируется э. д. с. и протекает ток, противодействующий перемещению. До конечной отметки при этом отклонить стрелку не удастся. Если прибор имеет несколько зажимов или переключатель пределов изменения, то замыкать нужно те зажимы и при таком положении переключателя, при котором сопротивление в цепи рамки наименьшее.

Для проверки балансировки подвижной части прибор отклоняют от рабочего положения, обозначенного на шкале, примерно на 10°. Отклонение стрелки при этом должно быть примерно равно основной погрешности прибора (класс точности прибора указывается на шкале) или еще меньше. Если на приборе рабочее положение не указано, то он должен соответствовать этому требованию при двух положениях шкалы — вертикальном и горизонтальном.

Такому внешнему осмотру рекомендуется подвергать всякий приобретаемый прибор. Некондиционные приборы следует осматривать особенно тщательно. Неплохо захватить с собой в этом случае гальванический элемент типа 1,3ФМЦ-0,25 с последовательно включенным резистором переменного сопротивления в 30—50 *ком*. С таким нехитрым приспособлением можно быстро и уверенно определить исправность прибора почти по всем параметрам, что сбережет время и труд в дальнейшем.

При покупке прибора следует обратить внимание на шкалу. Прибор мог быть градуирован с добавочным сопротивлением, шунтом, трансформаторами тока или напряжения, с наружным термопреобразователем, а приобретается или намечается к использованию без них. На шкале в этом случае имеются соответствующие обозначения: НШ, ДС, ТТ, ТН и т. п. Это значит, что цена деления шкалы, а, может быть, и характер ее будут отличаться от нанесенных на приборе.

Если на приборе класс точности не обозначен, но имеется зеркальная полоска для устранения параллакса, то прибор относят к классу 0,2 при длине шкалы порядка 300 *мм*, классу 0,5 при длине шкалы порядка 130 *мм* и к классу 1,0 в случае малогабаритных приборов. При отсутствии зеркальной полоски класс прибора можно приблизительно установить по форме стрелки: прибор относят к классу 1,0 или 1,5 (малогабаритный прибор) при ножевидной стрелке и к классу 2,5 или 4,0 (малогабаритный прибор) при копьевидной стрелке.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

7. Магнитоэлектрические амперметры

Измерительная цепь амперметра (миллиамперметра, микроамперметра) содержит только рамку измерительного механизма. Для измерения тока амперметр включают в разрыв цепи, т. е. последовательно с нагрузкой. Предел измерения амперметра определяется током полного отклонения подвижной части и зависит от конструкции измерительного механизма. Регулировка чувствительности прибора производится магнитным шунтом или размагничиванием магнита на специальной установке.

Широкое применение находят щитовые малогабаритные микроамперметры и миллиамперметры, используемые в качестве индикаторных приборов в измерительной аппаратуре. Некоторые из них показаны на рис. 8. Удобны приборы с большой шкалой, например, типа М24 (длина шкалы 95 *мм*). Некоторые из этих приборов имеют зеркало для устранения параллакса (М265). Щитовые приборы выпускаются классов точности 1; 1,5; 2,5. Наиболее чувствительными являются микроамперметры типов М132 и М900, выпускаемые с конечным значением шкалы 10 *мка*. Длина шкалы у микроамперметра М900 равна 88 *мм*.

Для расширения пределов измерения тока применяют шунты. Шунт представляет собой резистор, включаемый в цепь измеряемого тока параллельно с измерительным механизмом (рис. 9, *а*). При этом через рамку измерительного механизма протекает лишь небольшая, но вполне определенная часть общего тока, что и дает возможность измерять ток, во много раз превышающий ток измерительного механизма.

Число, которое показывает, во сколько раз ток I в общей цепи больше тока $I_и$ через измерительный механизм, т. е. во сколько раз расширяется предел измерения тока при данных приборе и шунте, называется шунтовым множителем (шунтовым коэффициентом) $n = I/I_и$.

Шунты бывают индивидуальные и взаимозаменяемые. Первые из них изготовляются для какого-либо конкретного прибора. Сопротивление такого шунта и падение напряжения на нем, зависящие от прибора и желаемого предела измерения, могут быть самыми различными. Взаимозаменяемые, или калиброванные, шунты выпускаются по ГОСТ 8042-61 на вполне определенные номинальные токи и при этих токах имеют вполне определенные падения напря-

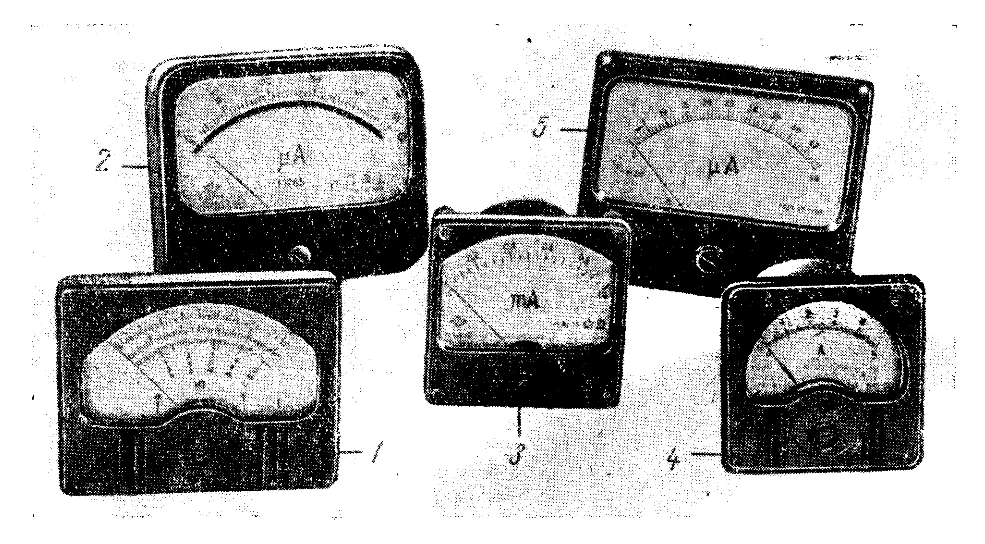


Рис. 8. Щитовые малогабаритные измерительные приборы магнитоэлектрической системы.

1 — прибор типа ИТ; *2* — прибор типа М265; *3* — прибор типа М4200; *4* — прибор типа ПМ-70; *5* — прибор типа М24.

жения: 60, 75, 100, 150 и 300 *мв*. Раньше они изготовлялись на номинальные напряжения 45, 75, 100 и 150 *мв*.

Если необходимо построить многопредельный прибор, то измерительный механизм можно снабдить либо комплектом отдельных шунтов по числу дополнительных пределов измерения, либо одним многопредельным шунтом. Шунты можно переключать штепселем, рычажным переключателем или просто перенесением провода с одного зажима на другой. Конечно, удобно иметь на приборе лишь два зажима для включения в цепь, а нужный предел измерения устанавливать рычажным переключателем (при токах, не превышающих возможности переключателя). Однако для этого схема с комплектом отдельных для каждого предела шунтов (рис. 9, *б*) не может быть рекомендована. Ее недостаток заключается в том, что переходные сопротивления контактов переключателя оказываются включенными последовательно с шунтами. Если по случайной причине (окисление, загрязнение, подгорание) сопротивление контакта возрастет, то при малом сопротивлении шунта это повлечет за собой ошибки в измерениях. Разрыв же цепи шунта приведет к повреждению измерительного механизма. А такой разрыв может быть при переключении пределов измерения в момент, когда прибор находится под нагрузкой. Чтобы избежать повреждений, необходима такая конструкция переключателя, при которой не происходило бы разрыва цепи в процессе переключения. Для этого ползунок должен вначале замыкать накоротко соседние контакты и только после этого сходить с первого из них (так называемые переключатели с перекрытием контактов), так как иначе в момент переключения весь измеряемый ток пойдет через измерительный механизм и прибор будет поврежден.

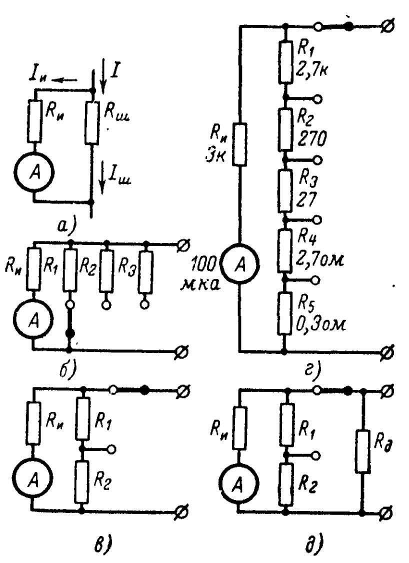


Рис. 9. Схемы амперметров с шунтами.

а — однопредельный амперметр; *б* — многопредельный амперметр с набором шунтов; *в* — двухпредельный амперметр со ступенчатым шунтом; *г* — пятипредельный амперметр со ступенчатым шунтом (к расчетному примеру); *д* — двухпредельный амперметр с постоянным входным сопротивлением.

Наибольшее распространение получили многопредельные ступенчатые шунты, включаемые по кольцевой схеме (рис. 9, *в*). Здесь в моменты переключений происходит разрыв общей цепи измеряемого тока и ток через прибор при этом вообще не протекает. В принципе переключение пределов измерения можно производить под

нагрузкой без риска повредить измерительный механизм, каков бы ни был переключатель. Повреждение контактов может повлиять лишь на ток в общей цепи, но прибор покажет всегда именно тот ток, который в данный момент протекает в цепи.

У многопредельных ступенчатых шунтов есть и недостаток, заключающийся в том, что ток полного отклонения подвижной части прибора не может быть принят за первый предел измерения, потому что прибор на первом пределе зашунтирован суммой сопротивлений ступенчатого шунта. Первый предел измерения в n_1 раз больше тока полного отклонения.

Расчет шунтов. Чтобы получить формулу для расчета индивидуального шунта, заметим, что падения напряжений на шунте и измерительном механизме равны между собой: $I_и R_и = I_ш R_ш$. С другой стороны $I = I_и + I_ш$. Отсюда получим:

$$R_ш = \frac{R_и}{n-1}. \tag{1}$$

Таким образом, для расширения предела измерения тока в n раз сопротивление шунта должно быть в $n-1$ раз меньше сопротивления цепи измерительного механизма.

Как рассчитать ступенчатый многопредельный шунт? Предположим, что прибор имеет два предела измерения (см. рис. 9, *в*). На самом чувствительном из них шунтом является сумма сопротивлений $R_1 + R_2$. Применяя для этого случая формулу (1), получим:

$$R_1 + R_2 = \frac{R_и}{n_1 - 1},$$

где n_1 — шунтовой множитель для этого предела.

На втором, более грубом пределе измерения резистор R_1 включен последовательно с сопротивлением измерительного механизма, а шунтом служит резистор R_2. Применяя ту же формулу, получим:

$$R_2 = \frac{R_1 + R_и}{n_2 - 1},$$

где n_2 — шунтирующий множитель для второго предела измерения.

Отсюда найдем сопротивления резисторов шунта

$$R_1 = R_и \frac{n_1}{n_1 - 1}\left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2}\right); \tag{2}$$

$$R_2 = R_и \frac{n_1}{(n_1 - 1)\, n_2}. \tag{3}$$

При любом числе пределов измерения тока сопротивление k-го резистора шунта рассчитывается по формуле

$$R_k = R_и \frac{n_1}{n_1 - 1}\left(\frac{1}{n_k} - \frac{1}{n_{k+1}}\right). \tag{4}$$

При вычислении последнего сопротивления (у двухпредельного прибора это R_2, а у восьмипредельного R_8) следует иметь в виду, что $n_{k+1} = \infty$. Это легко понять. Вернемся для этого к двухпредельному прибору. Будем считать, что у него есть третий предел, но так как с концом второго шунта соединен уже выходной зажим, то сопроти-

вление шунта на третьем пределе равно нулю. Это значит, что для полного отклонения стрелки прибора нужен ток бесконечно большой, т. е. $n_3 = I/I_и = \infty$. Подставив $n_3 = \infty$ в формулу (4), мы для R_2 двухпредельного прибора получим уже известное выражение (3).

Пример. Пусть мы располагаем щитовым малогабаритным микроамперметром типа М24 с током полного отклонения 50 *мка* и сопротивлением 3 000 *ом* и хотим изготовить к нему многопредельный кольцевой шунт на следующие пять пределов измерения: 100 *мка*, 1 *ма*, 10 *ма*, 100 *ма* и 1 *а* (рис. 9, *г*). Для этого нам нужно определить сопротивления резисторов шунта.

Шунтовые множители в соответствии с формулой (12) будут:

$$n_1 = \frac{100}{50} = 2; \quad n_2 = \frac{1\,000}{50} = 20; \quad n_3 = \frac{10\,000}{50} = 200;$$

$$n_4 = \frac{100\,000}{50} = 2\,000; \quad n_5 = \frac{1\,000\,000}{50} = 20\,000.$$

В соответствии с этим по формуле для R_k найдем необходимые нам сопротивления резисторов:

$$R_1 = 3\,000\,\frac{2}{1}\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{20}\right) = 6\,000\,\frac{9}{20} = 2\,700\ ом = 2{,}7\ ком;$$

$$R_2 = 3\,000\,\frac{2}{1}\left(\frac{1}{20} - \frac{1}{200}\right) = 6\,000\,\frac{9}{200} = 270\ ом;$$

$$R_3 = 3\,000\,\frac{2}{1}\left(\frac{1}{200} - \frac{1}{2\,000}\right) = 27\ ом;$$

$$R_4 = 3\,000\,\frac{2}{1}\left(\frac{1}{2\,000} - \frac{1}{20\,000}\right) = 2{,}7\ ом;$$

$$R_5 = 3\,000\,\frac{2}{1}\cdot\frac{1}{20\,000} = 0{,}3\ ом.$$

Сопротивление прибора выражается чаще всего не круглым числом. При этом можно, конечно, рассчитать шунты обычным порядком и изготовить их в соответствии с полученными результатами. Но можно также включить последовательно с прибором резистор такого сопротивления, чтобы сумма их сопротивлений составила круглое число и рассчитывать шунты, исходя из этого нового значения сопротивления прибора. Правда, в этом случае несколько увеличится сопротивление амперметра на всех пределах, но зато получатся более удобные значения сопротивлений шунтов.

Переключение пределов измерения в многопредельных амперметрах влечет за собой изменение сопротивления прибора. Между тем это иногда нежелательно. Например, при измерении выходной мощности какого-нибудь устройства его нагрузка должна быть одной и той же независимо от уровня мощности. Посмотрим, как можно сделать сопротивление многопредельного амперметра неизменным.

Вернемся к двухпредельному амперметру со ступенчатым шунтом, ограничиваясь для простоты рассмотрением этого случая. Чтобы сопротивление амперметра на обоих пределах было одинаково, сопротивления R_2 и $R_и$ должны быть одинаковыми, т. е. $R_2 = R_и$.

Действительно, резистор R_1 включается попеременно в параллельные ветви, одна из которых содержит резистор R_2, а другая резистор $R_и$ (измерительный механизм). Эквивалентное сопротивление цепи будет оставаться неизменным при любом значении R_1, если остальные два сопротивления цепи R_2 и $R_и$ равны между собой. Этот результат можно получить и формально, приравняв выражения для сопротивлений прибора на обоих пределах измерения

$$\frac{(R_1 + R_2) R_и}{R_1 + R_2 + R_и} = \frac{(R_1 + R_и) R_2}{R_1 + R_2 + R_и},$$

откуда $R_2 = R_и$.

При расчете двухпредельного амперметра у нас имеются четыре величины (n_1, n_2, R_1 и R_2), значения которых мы можем варьировать. Раньше они должны были удовлетворять двум условиям (2) и (3), что позволяло задавать произвольно значения двух величин, например n_1 и n_2. Теперь же появилось третье условие $R_2 = R_и$, в связи с чем значения шунтовых множителей n_1 и n_2 уже не могут быть независимы. Связь между ними мы получим из формулы (3), подставив $R_2 = R_и$:

$$\frac{n_1}{n_2 (n_1 - 1)} = 1.$$

При произвольном выборе одного из шунтовых множителей второй приобретает вполне определенное значение. Для восстановления их независимости необходимо ввести в измерительную цепь прибора дополнительную ветвь, замкнув выходные зажимы резистором $R_д$ (рис. 9, *д*). При этом значения обоих шунтовых множителей могут быть выбраны независимо друг от друга. Сопротивления резисторов находят по следующим формулам:

$$R_1 = \frac{n_2 - n_1}{n_1} R_и;$$

$$R_2 = R_и;$$

$$R_д = \frac{1}{(n_2 - 1)\frac{n_1}{n_2} - 1} R_и.$$

Сопротивление амперметра на обоих пределах измерения одинаково и равно:

$$R_{вх} = \frac{R_и}{n_1}.$$

Конструкции шунтов. Выпускаемые промышленностью взаимозаменяемые шунты (ГОСТ 8042-61) состоят из массивных наконечников из красной меди, между которыми впаяны манганиновые стержни или пластины. Эти шунты снабжаются двумя парами зажимов. Более массивные зажимы служат для включения шунта в цепь и называются токовыми. Другая пара зажимов (потенциальные) предназначена для подключения измерительного механизма (рис. 10).

При измерениях переходные сопротивления потенциальных контактов оказываются включенными последовательно с большим сопротивлением измерительного механизма и поэтому не влияют на

результат измерения. Переходные же сопротивления токовых зажимов включены до точек разветвления тока (шунт и измерительный механизм) и также не могут вызвать погрешностей.

Используя взаимозаменяемый калиброванный шунт, нужно убедиться, что номинальное падение напряжения на шунте соответствует номинальному падению напряжения на приборе. Например, для микроамперметра М24 (ток полного отклонения 50 *мка*, сопротивление 300 *ом*) нужен шунт на 150 *мв*, так как $50 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^{3} = 150$ *мв*. Если же сопротивление какого-либо прибора меньше, например 263 *ом*, то для указанного шунта надо последовательно с прибором включить резистор сопротивлением 737 *ом*.

Шунты могут быть изготовлены самостоятельно из манганинового константанового или нихромового провода. Сечение провода должно быть достаточным, чтобы исключить заметное нагревание шунта протекающим через него током. В качестве шунтов возможно

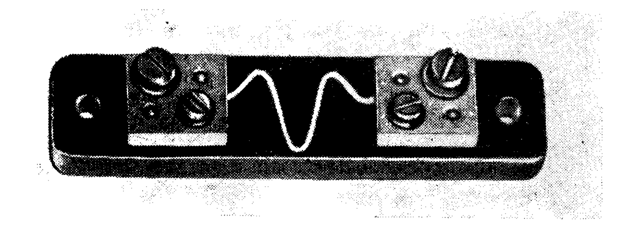


Рис. 10. Внешний вид шунта.

использовать проволочные резисторы типа ПКВ, а также переменные проволочные резисторы типов ПП1 и ПП3. Последние выпускаются на номинальные значения от 2,7 *ом* до 20 *ком* и мощность рассеяния 1 и 3 *вт* (нормаль НГХО 468.001). Из них удобны те, которые имеют зажимную гайку. Нижним пределом сопротивления шунта в любительском многопредельном универсальном приборе следует считать примерно 0,3 *ом*. При меньшей величине переходные сопротивления переключателя могут внести неопределенную погрешность.

Переключатели для шунтов. Так как радиолюбителям редко приходится измерять токи более 1—3 *а*, то для переключения шунтов можно использовать обычные галетные переключатели с пластмассовыми платами, предназначенные для коммутации электрических цепей в радиотехнических устройствах с постоянным напряжением до 350 *в* и переменным до 250 *в* при токе 0,5 *а* и максимальной мощности 25 *вт*. Для уменьшения переходных сопротивлений и нагрузки на контакты применяют переключатели на несколько направлений (на одной плате бывает до четырех направлений), включая контакты этих направлений параллельно.

Переходное сопротивление контактной пары галетного переключателя составляет не более 0,03 *ом*, а после 10 000 переключений не более 0,05 *ом*. С учетом параллельного включения контактов нижним пределом сопротивления шунта следует считать около

0,2 *ом* иначе переходные сопротивления переключателя могут внести трудно учитываемые погрешности. Конечно, при отказе от переключателя этот предел можно снизить в 5—10 раз.

Галетные переключатели со стеатитовыми платами для переключения шунтов не годятся.

Щеточные переключатели с пластмассовыми платами предназначены для коммутации цепей постоянного и переменного токов до 1 *а*. Переходное сопротивление контактной пары у них вначале не более 0,05 *ом*, а после 5 000 переключений не более 0,2 *ом*. При повышенной влажности воздуха сопротивление контактов заметно увеличивается. В основном это связано с окислением поверхности контактов. Для улучшения работы контактов их смазывают техническим (не борным!) вазелином. Смазка предохраняет контакты от окисления и, кроме того, смешиваясь с частицами металла, которые освобождаются при трении контактных пар, образует проводящую пасту, уменьшающую переходное сопротивление.

Такие переключатели выпускаются двух видов и различаются по углу между рабочими контактами: 30° (без перекрытия контактов при переключении) и 15° (с перекрытием контактов). У первых переключение осуществляется с разрывом цепи, а у вторых — без ее разрыва. Переключатели с углом 15° пригодны для схемы с набором отдельных шунтов (см. рис 9, *б*), позволяющей полностью использовать чувствительность микроамперметра, чего нельзя сделать при кольцевой схеме шунта.

Укажем также переходное сопротивление между замкнутыми контактами тумблеров. При токе до 0,5 *а* оно не более 0,04 *ом*, а при токах 3—6 *а* не более 0,02 *ом*.

8. Магнитоэлектрические вольтметры

У вольтметра измерительная цепь представляет собой рамку измерительного механизма, последовательно с которой включено добавочное сопротивление. Это сопротивление совместно с сопротивлением рамки обеспечивает преобразование измеряемого напряжения в ток, необходимый для отклонения подвижной части измерительного механизма. Предел измерения вольтметра зависит от тока $I_н$ полного отклонения подвижной части прибора, сопротивления его рамки $R_и$ и сопротивления добавочного резистора $R_д$

$$U_н = I_н (R_д + R_и).$$

Отсюда добавочное сопротивление, необходимое для получения заданного предела измерения,

$$R_д = \frac{U_н}{I_н} - R_и.$$

Для изменения предела измерения нужно включить другое добавочное сопротивление. Снабжая измерительный механизм набором добавочных резисторов и переключателем, получают многопредельные вольтметры (рис. 11,*а*). Часто используют не раздельное, а ступенчатое включение добавочных резисторов (рис. 11, *б*). Сопротивления резисторов рассчитывают в этом случае по следующим

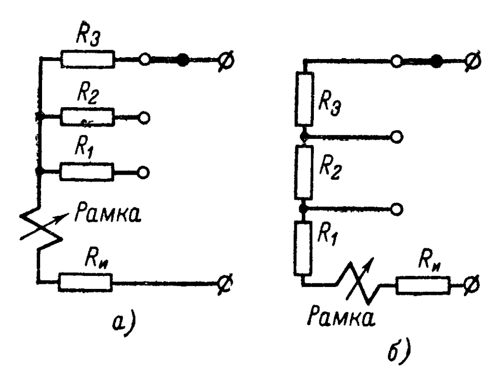


Рис. 11. Схемы многопредельных вольтметров.

а — с раздельным включением добавочных резисторов; *б* — со ступенчатым включением добавочных резисторов.

Рис. 12. Внешний вид добавочного сопротивления.

формулам:

$$R_1 = \frac{U_1 - I_н R_и}{I_н};$$

$$R_2 = \frac{U_2 - U_1}{I_н};$$

$$R_3 = \frac{U_3 - U_2}{I_н};$$

$$R_n = \frac{U_n - U_{n-1}}{I_н}.$$

Промышленностью выпускаются щитовые и переносные взаимозаменяемые калиброванные, а также ограниченно взаимозаменяемые

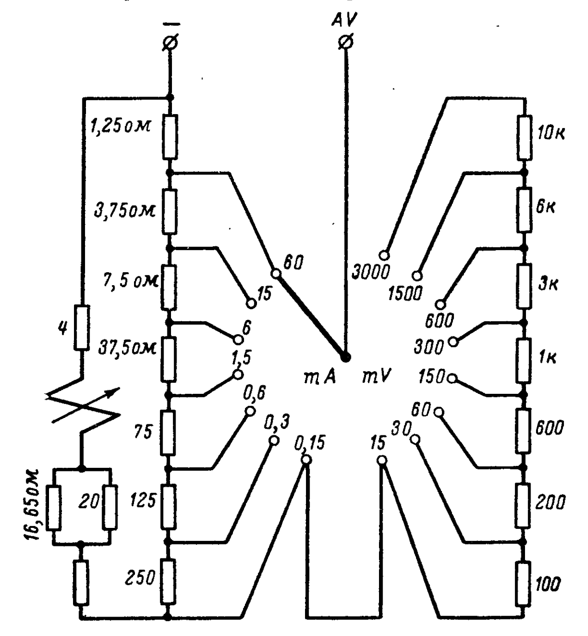


Рис. 13. Принципиальная схема милливольтмиллиамперметра М1109.

добавочные сопротивления (ГОСТ 8623-60) с номинальным напряжением до 15 000 *в* постоянного и переменного токов частоты от 10 *гц* до 20 *кгц*. Номинальный ток калиброванных добавочных сопротивлений при номинальном напряжении устанавливается 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 3,0; 5,0; 7,5; 30 и 60 *ма*. Внешний вид одного из таких добавочных сопротивлений показан на рис. 12.

Общий измерительный механизм и простота измерительных цепей амперметров и вольтметров приводят к тому, что часто эти

приборы объединяют и выпускают под названием вольтамперметров. Для примера на рис. 13 показана принципиальная схема, а на рис. 14 — внешний вид милливольтмиллиамперметра типа М1109. Он имеет семь пределов измерения по току (0,15—0,3—0,6—1,5—6—

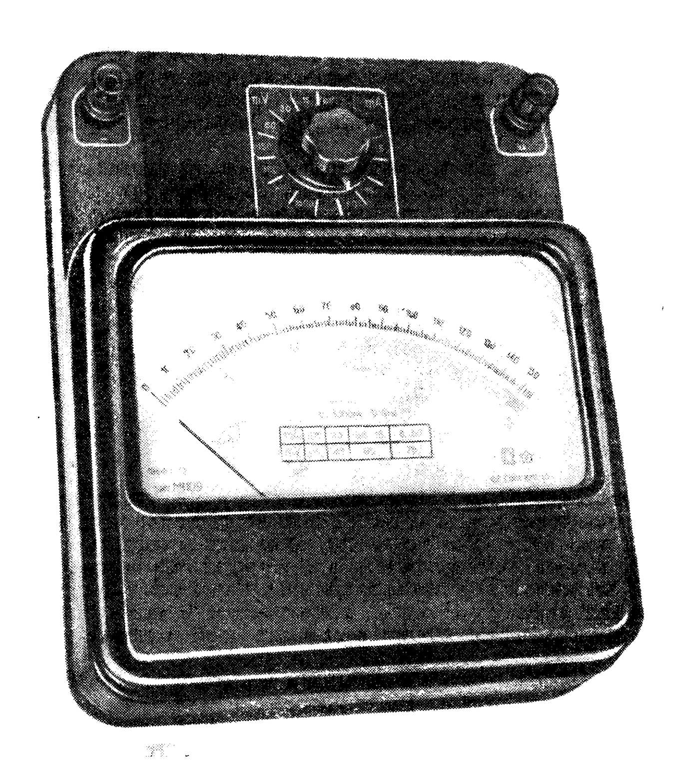


Рис. 14. Внешний вид милливольтмиллиамперметра М1109.

15—60 *ма*) и восемь пределов измерения по напряжению (15—30—60—150—300—600—1 500—3 000 *мв*). Падение напряжения на указанных пределах измерения по току составляет от 15 до 75 *мв*, а потребление тока на пределах измерения по напряжению равно 0,15 *ма*. Этот прибор имеет класс точности 0,2.

9. Приборы выпрямительной (детекторной) системы

Эти приборы состоят из чувствительного и точного магнитоэлектрического механизма и выпрямителя, преимущественно полупроводникового или лампового. Из полупроводниковых выпрями-

телей раньше использовались почти исключительно меднозакисные (купроксные). В настоящее время для выпрямителей применяют германиевые или кремниевые диоды. Такие выпрямители имеют практически неограниченный срок службы, малые габариты и вес, что позволяет делать выпрямительные приборы простыми, компактными и надежными в работе. Нижняя граница частотного диапазона детекторных приборов составляет 10—20 *гц*, верхняя же определяется собственной емкостью диодов и имеет порядок сотен килогерц. Иногда для расширения частотного диапазона в сторону высоких частот применяют коррекцию (включают последовательно с шунтом индуктивности, шунтируют добавочные сопротивления емкостями и т. п.).

Как прямое, так и обратное сопротивления диодов зависят от температуры. Кроме того, характеристика диодов при малых токах нелинейна, что служит причиной неравномерности начальных участков шкал многопредельных приборов. Способы уменьшения влияния обоих этих явлений будут рассмотрены ниже.

Детекторные приборы показывают среднее значение тока или напряжения (что обусловлено применением магнитоэлектрического измерительного механизма,) а градуируют их в действующих значениях переменного тока синусоидальной формы. Отношение действующего значения тока I к среднему значению тока $I_{ср}$ называется коэффициентом формы кривой

$$K_ф = \frac{I}{I_{ср}}.$$

Для синусоиды $K_ф = 1{,}11$; это значение коэффициента и учитывается при градуировке прибора. Если форма кривой протекающего через прибор тока отлична от синусоиды, то возникает погрешность показаний, причем компенсировать эти погрешности нельзя.

В зависимости от схемы включения и числа диодов применяют одно- или двухполупериодное выпрямление. В основном распространено последнее. Схемы различных выпрямителей показаны на рис. 15.

Простейшая однополупериодная, показанная на рис. 15, *а*, не применяется потому, что она вызывает искажение формы тока в цепи, а также потому, что к диоду в обратном направлении прикладывается большое напряжение (амплитудное значение напряжения источника, питающего цепь). На рис. 15,*б* показана используемая в приборах однополупериодная схема выпрямительного устройства. Здесь диод $Д_2$ пропускает обратную полуволну тока и защищает диод $Д_1$ от пробоя. Сопротивление R_1, равное сопротивлению измерительного механизма, включено для уравнивания сопротивления измерительной цепи в обоих направлениях. Ток через измеритель

$$I_и = \frac{I}{2K_ф}.$$

В двухполупериодной мостовой схеме с четырьмя диодами (рис. 15, *в*) ток через измеритель вдвое больше, чем в однополупериодной схеме

$$I_и = \frac{I}{K_ф}.$$

Эта схема имеет наибольшую чувствительность, но и наибольшую погрешность от изменения температуры окружающей среды. Последовательно с измерителем здесь включены два диода, а не один, как в предыдущей схеме. Поэтому при малых измеряемых напряжениях однополупериодная схема может оказаться более выгодной.

В двухполупериодной мостовой схеме с двумя диодами (рис. 15, *г*) ток через измеритель

$$I_{и} = \frac{IR}{K_{ф}(2R + R_{и})},$$

где R — сопротивление резистора в плече моста;

$R_{и}$ — сопротивление измерителя.

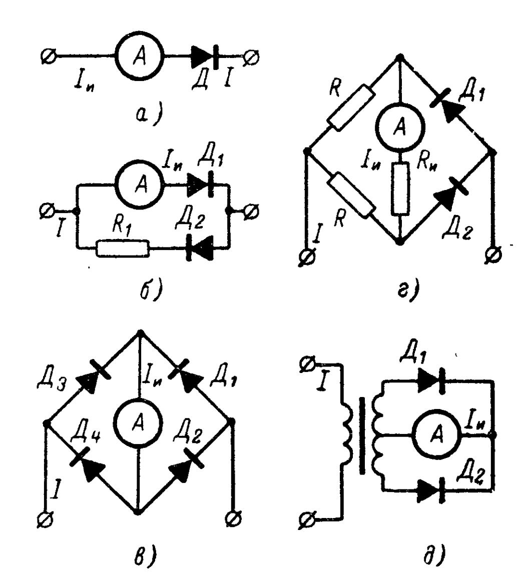


Рис. 15. Схемы выпрямительных устройств измерительных приборов.

а — однополупериодная; *б* — однополупериодная с двумя диодами; *в* — мостовая; *г* — мостовая с заменой двух диодов резисторами; *д* — двухполупериодная трансформаторная.

Такая схема менее чувствительна по сравнению с предыдущей, но зато она независима от температуры. Эта схема удобна при измерении больших токов (каждый полупериод один из ее резисторов R служит шунтом).

На рис 15, *д* приведена двухполупериодная трансформаторная схема выпрямителя. Эта схема имеет наименьшее собственное потребление энергии, и измеритель в ней отделен от измеряемой цепи Ее недостатки заключаются в необходимости изготовления трансформатора и в зависимости его коэффициента трансформации от частоты, что сужает частотный диапазон измерений.

Сочетание какой-либо схемы выпрямления с шунтами или добавочными сопротивлениями образует выпрямительные (детекторные) амперметры и вольтметры. У вольтметров добавочные сопротивления включают в цепь переменного тока перед выпрямляющим устройством. Включать их в цепь выпрямленного тока нецелесооб-

разно, так как в этом случае к тем диодам, которые в один из полупериодов не проводят, будет приложено большое напряжение (до амплитудного значения измеряемого напряжения) и количество диодов придется увеличить, чтобы не допустить их пробоя. Шунты также включают в цепь переменного, а не выпрямленного тока, чтобы не менять нагрузку диодов и не перегружать их.

На рис. 16 показана схема детекторного прибора в общем виде. Если это вольтметр, то из схемы надо исключить шунтирующую цепь, состоящую из резисторов $R_{ш1}$ и $R_{ш2}$, если же это амперметр, то исключить надо резисторы добавочных сопротивлений $R_д$ и $R'_д$. Элементами, корректирующими частотную характеристику, служат индуктивность L и емкость C. При повышении частоты увеличивается шунтирующее действие емкостей диодов, и показания прибора должны уменьшаться. Но одновременно с этим благодаря индуктивности L возрастает сопротивление шунта и в выпрямляющее устройство ответвляется бóльшая доля общего тока. Так же действует и емкость C (с увеличением частоты общий ток в выпрямительное устройство увеличивается). Температурные влияния компенсируют тем, что сопротивления $R_{ш1}$ (часть сопротивления шунта) и $R_к$ (компенсационное сопротивление) делают из меди. В этом случае при повышении с температурой сопротивления рамки одновременно повышается и сопротивление шунта.

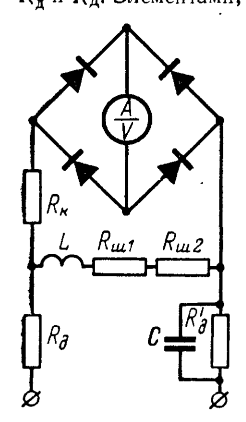


Рис. 16. Схема детекторного измерительного прибора.

Особо следует сказать о собственном потреблении энергии и линейности шкалы прибора. Пока выпрямительное устройство работает как измеритель тока (микроамперметр или миллиамперметр) без шунтов, его шкала линейна, а действующее сопротивление, которое оно оказывает протекающему току, нелинейно. Это сопротивление равно сумме сопротивлений диодов в прямом направлении и сопротивления измерителя тока. Характеристика же диодов нелинейна (на начальном участке их сопротивление велико и с ростом напряжения уменьшается). Но как только мы включаем шунт, картина меняется. При малом напряжении ток идет через шунт и почти не идет через диоды в измеритель, при повышении же напряжения сопротивление диодов уменьшается и в выпрямительное устройство идет все бóльшая доля тока. Шунтовой множитель, как видим, не является неизменным: он становится таким лишь при достаточно больших напряжениях. То же самое будет, как легко сообразить, и в случае вольтметра. Ведь вольтметр вместе с тем сопротивлением, на котором производится измерение напряжения, образуют тот же амперметр, где это сопротивление играет роль шунта. Таким образом, при малых напряжениях шкалы детекторных приборов в общем случае нелинейны.

Рассмотрим теперь схему двухпредельного амперметра (рис. 17). На первом пределе измерения (зажимы *0—2*) шунтом служит сумма сопротивлений $R_1 + R_2$. Если мы хотим получить линейную шкалу, то падение напряжения на шунте следует выбирать достаточно боль-

шим, а измеритель должен быть невысокой чувствительности (можно включить параллельно измерителю дополнительно шунт). Однако при этом возрастает собственное потребление энергии. Поэтому обычно принимают компромиссное решение, оставляя нелинейным

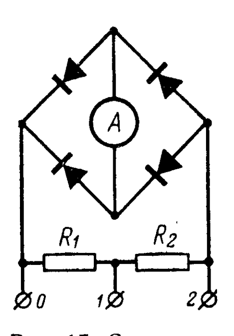


Рис. 17. Схема детекторного двухпредельного амперметра.

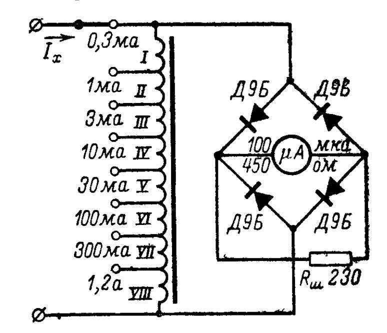


Рис. 18. Схема детекторного амперметра с автотрансформатором тока.

начальный участок шкалы в 10—15% от ее длины. При переключении на второй предел измерения (зажимы *0—1*), где шунтом является только сопротивление R_1, характер нелинейности шкалы изменится, поскольку теперь последовательно с диодами включено сопротивле-

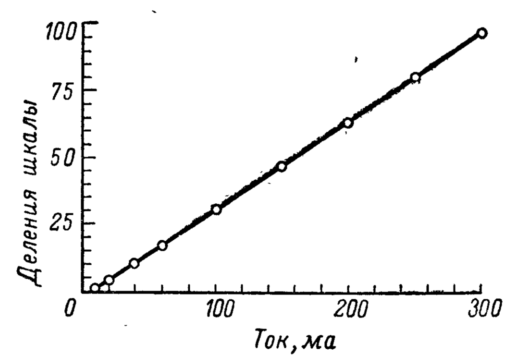


Рис. 19. Градуировочная линия амперметра на пределе измерения 300 *ма* и частоте 50 *гц*.

ние R_2. Мощность, рассеиваемая на резисторе R_2, тратится впустую, а чтобы компенсировать падение напряжения на этом резисторе, нужно увеличить падение напряжения на шунте R_1.

От указанных недостатков свободны многопредельные детекторные приборы с трансформатором тока. На рис. 18 приведена схема

изготовленного автором многопредельного амперметра с автотрансформатором тока. Автотрансформатор собран на пермаллоевом сердечнике сечением 1,8 *см*² (из пластин толщиной 1 *мм*). Обмотка выполнена проводом ПЭВ-2. Секция *I* этой обмотки содержит 2800 витков провода 0,08 *мм*, секция *II* — 800 витков провода 0,1 *мм*, секция *III*—280 витков провода 0,12 *мм*, секция *IV*—80 витков провода 0,16 *мм*, секция *V* — 28 витков провода 0,2 *мм*, секция *VI* — 8 витков провода 0,35 *мм*, секция *VII* — 3 витка провода 0,59 *мм* и секция *VIII* — 1 виток провода 1,2 *мм*. Указателем тока служит микроамперметр типа М265 со шкалой 0—100 *мка* и сопротивлением 450 *ом*. При помощи шунта $R_ш$ предел измерения микроамперметра расширен до 300 *мка*.

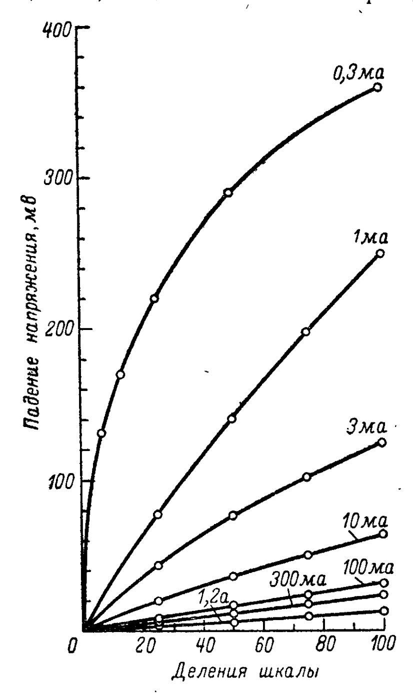


Рис. 20. Кривые, показывающие падение напряжения на амперметре с автотрансформатором тока.

Градуировочная линия этого прибора показана на рис. 19. Она линейна, но начинается не с нуля, а немного сдвинута по горизонтальной оси на отрезок в 1,7% от длины шкалы. Объясняется это тем, что при очень малых напряжениях (ниже потенциала отсечки диодов) ток замыкается через автотрансформатор, представляющий собой в этом случае шунт. Чтобы сделать шкалу полностью линейной, нужно на эту величину (1,7%) сдвинуть корректором стрелку прибора левее отметки механического нуля. Следует оговориться, что это справедливо только для одной частоты (1,7% получалось при частоте 50 *гц*); при других частотах сдвиг будет несколько иной из-за изменения индуктивного сопротивления автотрансформатора (при повышении частоты сдвиг уменьшается).

Кривые, приведенные на рис. 20, показывают падение напряжения на амперметре на всех его пределах измерения (0,3—1—3—10—30—100—300—1 200 *ма*). Они подтверждают то, что было сказано о входном сопротивлении амперметра без шунта. При этом заметен выигрыш в уменьшении сопротивления амперметра по сравнению с шунтовым вариантом. Сопротивление этого амперметра в конце шкалы на пределе измерения 0,3 *ма* составляет 1170 *ом*, на пределе 1 *ма* — 230 *ом*, на пределе 3 *ма* — 40 *ом*, на пределе 10 *ма* — 6,5 *ом*, на пределе 30 *ма* — 1 *ом*, на пределе 100 *ма* — 0,12 *ом*, на пределе 300 *ма* —0,02 *ом* и на пределе 1,2 *а* — 0,01 *ом*.

Для сравнения рассчитаем сопротивление шунта, который нужно было бы применить для получения предела измерения, например 300 *ма*, при таком же индикаторном приборе (300 *мка*, 150 *ом*). В этом случае при шунтовом множителе 300 *ма*/300 *мка* (0,3 *ма*) = = 1000, сопротивление шунта 150/ (1 000—1) ≈ 0,15 *ом*, т. е. в 7,5 раз больше сопротивления амперметра с автотрансформатором.

Частотный диапазон амперметра 20 *гц* — 20 *кгц*. Низкая верхняя граница объясняется слишком толстыми пластинами сердечника автотрансформатора и несекционированной его обмоткой. Для таких автотрансформаторов удобно использовать сердечники от микрофонных трансформаторов.

10. Термоэлектрические приборы

Эти приборы состоят из магнитоэлектрического измерительного механизма и термопреобразователя — устройства, преобразующего постоянный или переменный ток в термо-э. д. с. при помощи термопары, горячий спай которой нагревается измеряемым током, проходящим через нагреватель. По способу нагрева горячего спая термопары различают контактные и бесконтактные термопреобразователи. У контактных термопреобразователей горячий спай термопары приварен к нагревателю, а у бесконтактных он отделен от нагревателя. В последних термопара часто бывает протянута внутри тонкой стеклянной трубочки, на которую намотана нагревательная спираль.

Термопреобразователи на сравнительно малые токи обычно помещают в стеклянный баллончик, из которого выкачан воздух (вакуумные термопреобразователи), что способствует уменьшению влияния окружающей температуры. Промышленность выпускает вакуумные термопреобразователи типов ТВБ (бесконтактные) и ТВ (контактные).

Основными эксплуатационными параметрами термопреобразователей являются номинальный ток нагревателя (от 1 до 500 *ма* у ТВБ и от 50 *ма* до 1 *а* у ТВ), номинальная термо-э. д. с. — на выходе термопары (от 2,5 до 12 *мв* у ТВБ и 30 *мв* у ТВ), электрическое сопротивление нагревателя (от 600 до 0,8 *ом* у ТВБ и от 12 до 0,6 *ом* у ТВ) и термопары (от 40 до 2 *ом* у ТВБ и от 12 до 0,6 *ом* у ТВ) и величина допустимой перегрузки (150% от номинального тока у ТВБ и 120% у ТВ). Емкость между нагревателем и термопарой у термопреобразователей типа ТВБ лежит в пределах 0,3—1,2 *пф*, максимальная рабочая частота 100—200 *Мгц*.

Зависимость термо-э. д. с. от протекающего через нагреватель тока (градуировочная кривая) имеет нелинейный характер. Градуировочная кривая прикладывается к каждому экземпляру выпускаемого термопреобразователя, что позволяет без особых затруднений изготовить прибор из термопреобразователя и магнитоэлектрического микроамперметра.

Схема простейшего термоэлектрического прибора показана на рис. 21. Резистор $R_п$ (подгоночный) увеличивает сопротивление измерителя (чтобы он не нагружал термопару), а также снижает температурный коэффициент цепи измерителя в целом. В лабораторных приборах термоэлектрической системы применяют специальную температурную компенсацию, чаще всего при помощи термисторов.

По своему принципу действия термоэлектрические приборы являются измерителями тока, однако их используют и для измерения напряжения, включая последовательно с нагревателем добавочное сопротивление ($R_д$ на рис. 21). Пределы измерения тока можно изменить, применяя термопреобразователи различных типов, или же при помощи высокочастотных трансформаторов тока. Расширение пределов измерения термоэлектрических вольтметров производят переключением добавочных сопротивлений, которые должны быть безреактивными (например, типа БЛП).

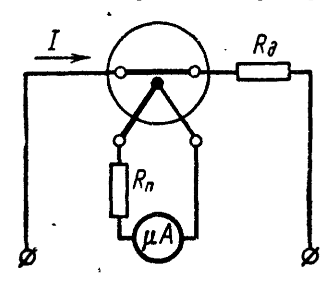


Рис. 21. Схема термоэлектрического измерительного прибора.

К достоинствам термоэлектрических приборов следует отнести широкий частотный диапазон измерений и независимость показаний прибора от формы тока. Заметим, что термоэлектрические приборы показывают действующее значение тока. Недостатки этих приборов заключаются в сравнительно небольшом пределе их перегрузки и в нелинейности их шкалы. Недостатком термоэлектрических вольтметров является также низкое входное сопротивление (300—350 *ом/в*).

Промышленность выпускает щитовые и переносные термоэлектрические приборы со встроенными и с отдельными термопреобразователями. Класс точности щитовых приборов 2,5 и 4, пределы измерения 1 *ма* — 5*а* (с трансформаторами тока до 500 *а*), диапазон 50 *гц* — 100 *Мгц* (в зависимости от пределов измерения). Переносные термоэлектрические приборы имеют класс точности 1 и 1,5 и частотный диапазон 10 *гц* — 100 *Мгц*.

11. Комбинированные приборы выпрямительной системы

Чаще всего переносные приборы выпрямительной системы выполняют комбинированными и многопредельными. В них общий магнитоэлектрический измерительный механизм может при помощи переключающего устройства объединяться с различными измерительными цепями, позволяя тем самым измерять как переменные, так и постоянные токи и напряжения, а также сопротивления постоянному току, емкости и уровни передач. Определяющим признаком комбинированных приборов считается наличие выпрямительного устройства, в связи с чем их и относят к выпрямительной системе. Комбинированные приборы называют также ампервольтомметрами, авометрами, тестерами. Благодаря своей универсальности, компактности, надежности и достаточной для большинства измерений точности комбинированные приборы получили самое широкое распространение. К ним относятся хорошо известные радиолюбителям приборы типов ТТ-1, ТТ-3, Ц-20, Ц-52, Ц-56, Ц-430 и др. Рассмотрим здесь устройство и коммутацию цепей двух из таких приборов.

На рис. 22 показана принципиальная схема, а на рис. 23 — внешний вид прибора типа ТТ-3. При измерении постоянного на-

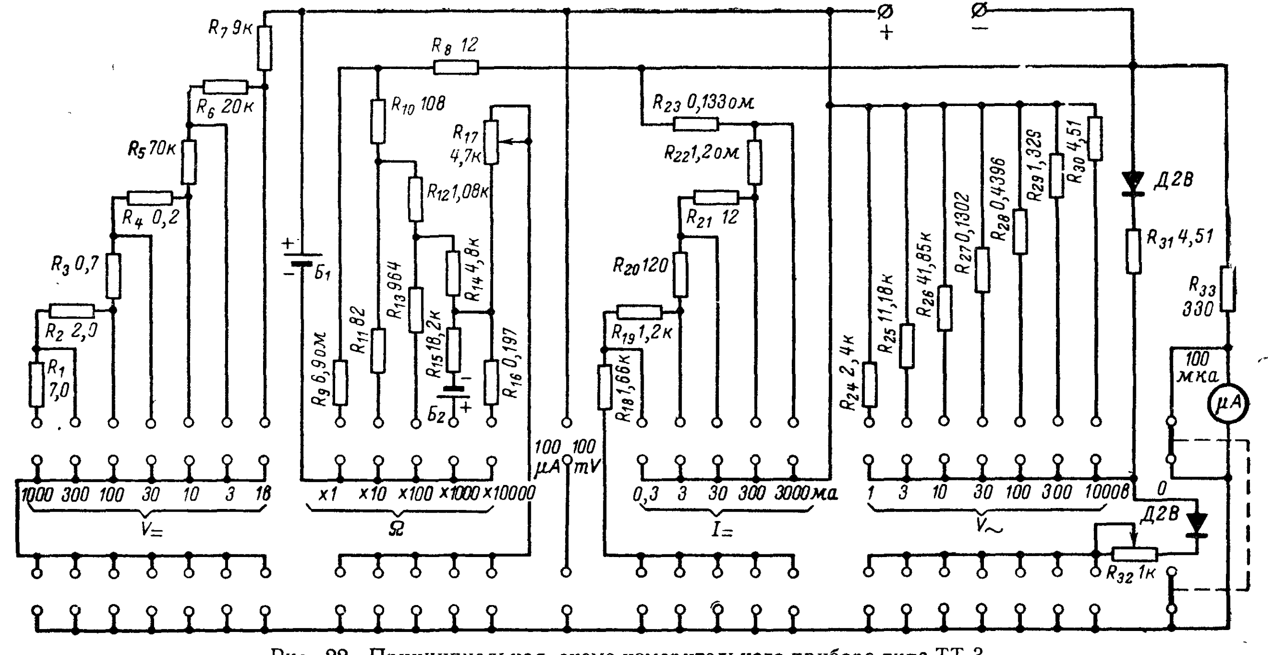


Рис. 22. Принципиальная схема измерительного прибора типа ТТ-3.

пряжения V_- последовательно с измерителем μA включаются добавочные сопротивления $R_1 - R_7$, а при измерении переменного напряжения $V_{\sim}$ — резисторы $R_{24} - R_{31}$ и полупроводниковые диоды типа Д2В. При измерении постоянного тока I_- параллельно измерителю включаются шунты $R_{18} - R_{23}$. Сопротивления резисторов $R_1 - R_{16}$, $R_{25} - R_{31}$ подобраны с погрешностью $\pm$ 0,5%, сопротивления $R_{18} - R_{20}$, R_{24} с погрешностью $\pm$ 0,2%, а R_{21}, R_{22} с погрешностью $\pm$ 0,4%.

При измерении сопротивлений постоянному току на пределах $\Omega \times 1$, $\Omega \times 10$ и $\Omega \times 100$ для питания схемы омметра используется гальванический элемент $Б_1$ типа 1,3ФМЦ-0,25. На пределе измерения $\Omega \times 1000$ последовательно с ним включается такой же элемент $Б_2$. Для измерения на пределе $\Omega \times 10\,000$ необходим внешний источник постоянного напряжения 24—30 *в*. Стрелку прибора устанавливают на нуль шкалы омметра переменным резистором R_{17}, ручка которого выведена на переднюю панель прибора.

Выбор вида и предела измерений осуществляется общим переключателем. При установке переключателя в положение 0 рамка измерительного механизма оказывается замкнутой накоротко, что обеспечивает ее успокоение при тряске. Размеры прибора 135×110×65 *мм*, а его вес 1 *кг*.

На рис. 24 показан внешний вид универсального прибора типа Ц-52, а на рис. 25 дана его принципиальная схема. Этот прибор предназначен специально для измерений в радиотехнических устройствах. Для расширения пределов измерения прибора по постоянному и переменному току для приборов типа Ц-52 выпускаются шунт и трансформатор тока.

Выбор вида и предела измерения производится переключателем $П_1$, а рода тока (постоянный или переменный) переключателем $П_2$. Их ручки выведены на переднюю панель прибора. При измерении постоянного тока параллельно измерителю включаются шунты R_{18}—R_{29}, а при измерении постоянного напряжения последовательно с ним оказываются включенными добавочные сопротивления $R_6 - R_{13}$.

При измерениях в цепях переменного тока измеритель включается в диагональ мостового выпрямителя, выполненного на полупроводниковых диодах типа Д2В. Шунты $R_{18} - R_{26}$ используются при измерении переменного тока, а добавочные сопротивления R_5 и $R_7 - R_{10}$ — при измерении переменного напряжения. На шкалах 3 и 7,5 *в* измерение переменного напряжения осуществляется по схеме измерения переменного тока с добавочными сопротивлениями R_2 и R_3.

Установка на нуль шкалы омметра производится потенциометром R_{33}, ручка которого выведена на переднюю панель прибора. Для питания омметра на шкалах $k\Omega \times 1$, $k\Omega \times 10$ и $k\Omega \times 100$ служит встроенный в прибор гальванический элемент $Б$ типа 1,3 ФМЦ-0,25. Для измерения на шкале $k\Omega \times 1000$ необходим внешний источник напряжения 15,5—19,5 *в*.

При измерении емкости источником питания служит электросеть переменного тока частоты 50 *гц* напряжением 190—240 *в*. В схему измерения входят образцовые конденсаторы C_1 и C_2, подобранные так, что при напряжении на входных зажимах 220 *в* стрелка прибора отклоняется на всю шкалу. Измеряемая емкость шунтирует прибор, ток через него уменьшается, а вместе с тем уменьшаются и показания.

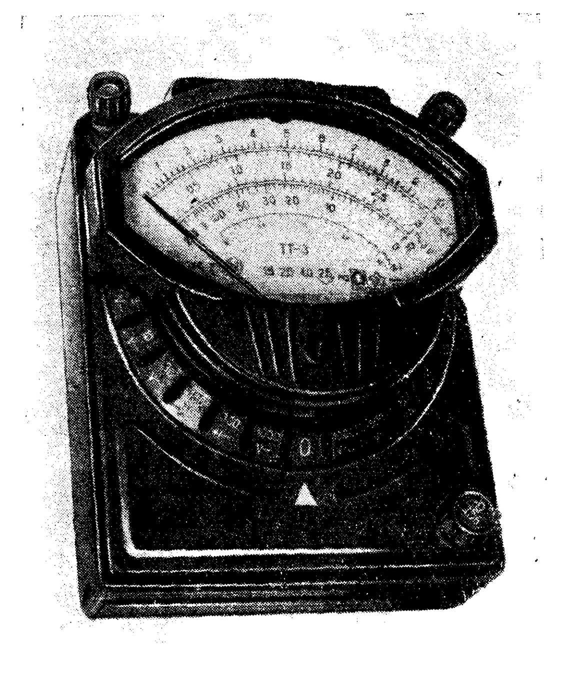


Рис. 23. Внешний вид измерительного прибора ТТ-3.

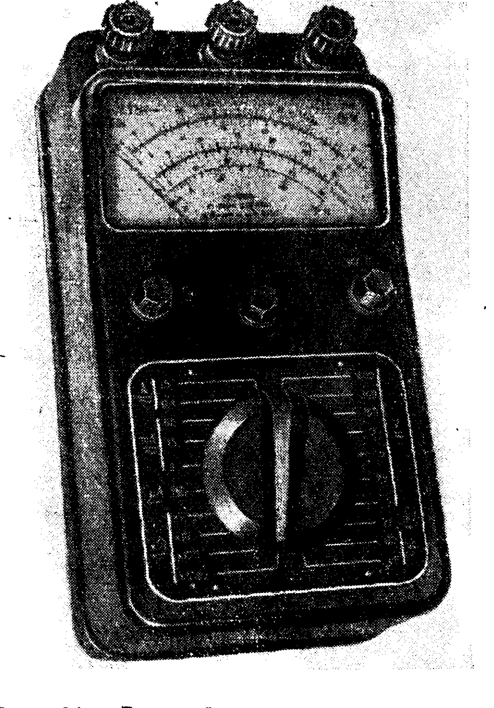


Рис. 24. Внешний вид универсального многопредельного прибора типа Ц-52.

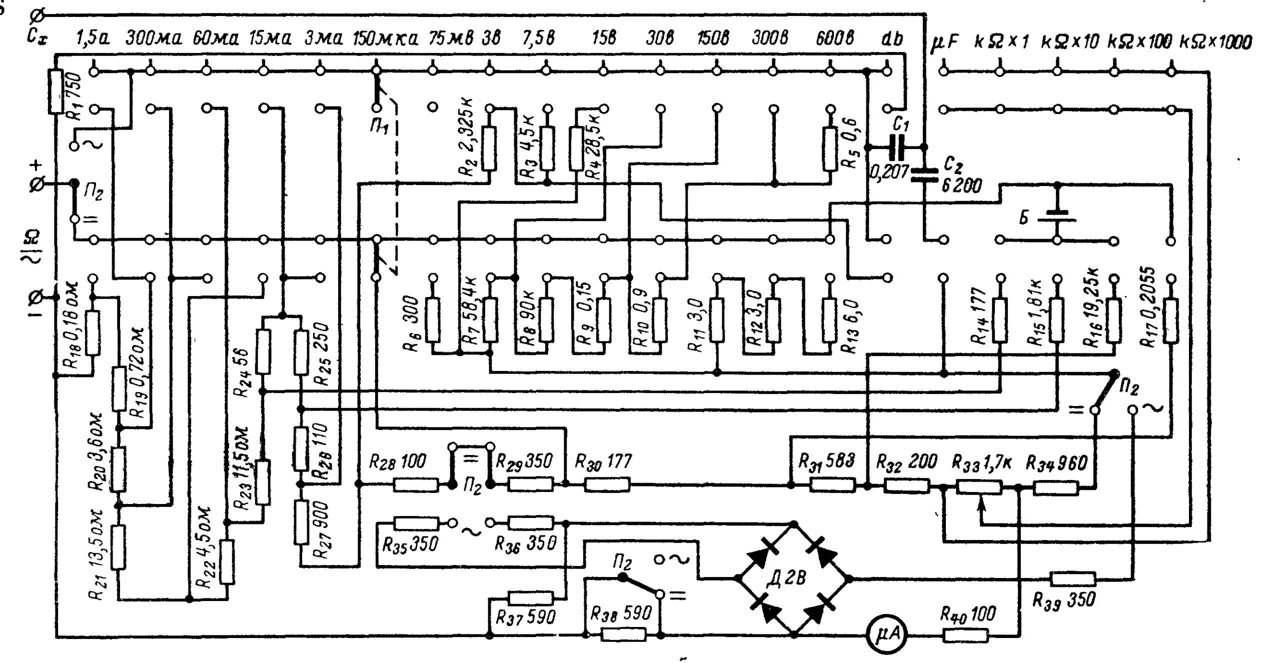


Рис. 25. Принципиальная схема универсального прибора типа Ц-52.

Для компенсации изменения напряжения электросети служит тот же потенциометр R_{33}, что и для установки стрелки на нуль шкалы омметра.

Измерение уровня передач осуществляется по схеме вольтметра с пределом измерения 3 *в.* При этом параллельно входным зажимам подключается резистор R_{41}, так что входное сопротивление прибора становится равным примерно 600 *ом.*

12. Другие системы приборов

Большей частью радиолюбитель имеет дело с магнитоэлектрическими приборами, с остальными же он встречается редко и поэтому о них мы изложим лишь самые основные сведения.

Электромагнитные приборы. Принцип действия измерительного механизма электромагнитной системы основан на взаимодействии магнитного поля, вызванного измеряемым током, с ферромагнитным подвижным элементом. Схематическое устройство такого механизма показано на рис. 26. На оси подвижной части механизма эксцентрично укреплен сердечник (якорь) *1* из пермаллоя или электротехнической стали. Проходящий через катушку *2* ток образует магнитное поле, которое стремится втянуть якорь внутрь катушки. При этом ось подвижной части механизма и связанная с ней стрелка поворачиваются до тех пор, пока вращающийся момент не сравняется с противодействующим, создаваемым пружинкой или подвесами. Вращающий момент пропорционален квадрату тока, поэтому и шкала прибора должна бы быть квадратичной, однако она зависит еще от формы сердечника и катушки, поэтому приданием им специальной формы удается получить шкалу, которая нелинейна лишь в начальной своей части. В этих приборах применяются как воздушные, так и магнитоиндукционные успокоители.

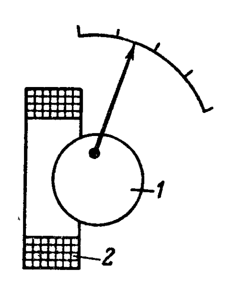


Рис. 26. Схематическое устройство электромагнитного измерительного механизма.

Электромагнитные приборы одинаково пригодны для постоянного и переменного токов. При протекании через катушку переменного тока одновременно изменяются и направление магнитного потока и полярность сердечника, вследствие чего знак вращающего момента не меняется. В этом случае вращающий момент пропорционален квадрату действующего значения тока, поэтому электромагнитные приборы и показывают действующее значение измеряемого переменного тока или напряжения.

Промышленность выпускает электромагнитные миллиамперметры, амперметры и вольтметры, пригодные для измерения в цепях постоянного и переменного токов. Наиболее точные из них имеют класс 0,5. Внешний вид трехпредельного амперметра типа Э59 класса 0,5 показан на рис. 27. Его номинальная область частот 45—55 *гц*, но с пониженной точностью измерений прибором можно пользоваться и в более широком диапазоне частот. Так, например, в диапазоне частот 1500—4000 *гц* погрешность прибора около ± 1,5%, а в диапазоне 4000—8000 *гц* — около ± 2,5%.

Электродинамические приборы. Принцип действия измерительного механизма электродинамической системы основан на взаимодействии тока, протекающего через подвижную катушку *1*, с магнитным полем, которое создается током, проходящим через неподвижные катушки *2*. Схематическое устройство такого механизма пока-

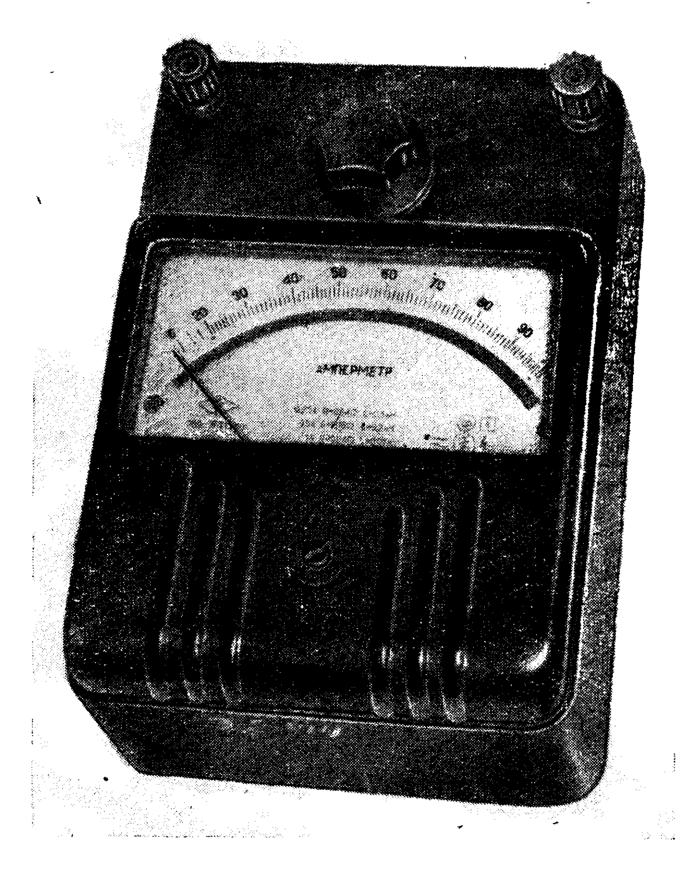


Рис. 27. Электромагнитный амперметр типа Э59.

зано на рис. 28. Подвижную катушку часто называют рамкой. Рамка и вся подвижная часть прибора схожи с подвижной частью магнитоэлектрического измерительного механизма.

Электродинамические приборы пригодны для измерения и на постоянном и на переменном токах. Вращающий момент пропорционален произведению действующих значений токов в подвижной

и неподвижных катушках и косинусу угла сдвига фаз между ними

$$M_{вр} = kI_1I_2 \cos \varphi.$$

Коэффициент пропорциональности зависит от формы и взаимного расположения катушек. Градуировку производят на постоянном токе, что обеспечивает ей высокую точность.

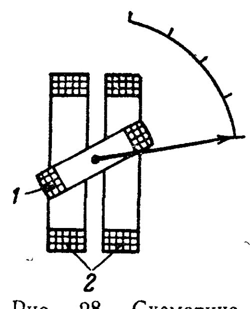


Рис. 28. Схематическое устройство электродинамического измерительного механизма.

Электродинамическую систему применяют в конструкциях наиболее точных приборов для измерения тока, напряжения и мощности в цепях постоянного и переменного токов. Измерительные цепи электродинамических приборов сравнительно сложны. Наиболее просты электродинамические миллиамперметры, поскольку измеряемый ток может быть пропущен полностью через последовательно соединенные неподвижные катушки и рамку. В этом случае $I_1 = I_2 = I$; $\cos \varphi = 1$ и $M_{вр} = kI^2$.

С электродинамическими измерительными механизмами выпускаются только приборы высоких классов точности (0,1—0,5).

Рис. 29. Электродинамический амперметр типа Д57.

Щитовые электродинамические приборы не изготовляются. Внешний вид электродинамического двухпредельного амперметра типа Д57 класса точности 0,1 показан на рис. 29. Он имеет световой указатель и нониусную шкалу, снабжен регулируемыми по высоте ножками и уровнем для установки его точно в горизонтальной плоскости.

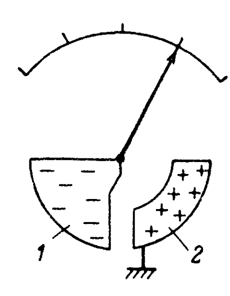


Рис. 30. Схематическое устройство электростатического измерительного механизма.

Разновидностью электродинамических приборов являются ферродинамические приборы, у которых неподвижная катушка снабжена ферромагнитным магнитопроводом. По конструкции они сходны с магнитоэлектрическими измерительными механизмами (в них вместо постоянного магнита применен электромагнит). Преимуществом таких приборов следует считать большой вращающий момент а к его недостаткам надо отнести малую точность, различие в показаниях на постоянном и переменном токах, небольшой частотный диапазон.

Электростатические приборы. Действие измерительного механизма электростатической системы основано на взаимодействии электрически заряженных проводников. По сути дела это конденсатор с системой подвижных и неподвижных электродов. Когда к прибору приложено напряжение, на этих электродах возникают заряды раз-

Рис. 31. Электростатический вольтметр типа С95.

ного знака, как и у всякого конденсатора. Но поскольку один из электродов *1* подвижен, он перемещается в направлении неподвижного электрода *2* (рис. 30) и увлекает за собой стрелку прибора. В отличие от всех остальных измерительных механизмов, действие которых основано на взаимодействии магнитных полей, в электростатическом приборе взаимодействие его подвижной и неподвижной частей создается непосредственно напряжением. Поэтому собственное потребление энергии электростатических приборов чрезвычайно мало. Эти приборы отличаются также пригодностью для непосредственных изменений постоянного и переменного напряжений, широким частотным диапазоном, незначительной зависимостью показаний от формы напряжения.

Если считать для простоты, что емкость не зависит от угла поворота подвижной части, то вращающий момент пропорционален квадрату измеряемого напряжения (при переменном токе — квадрату действующего значения)

$$M_{\text{вр}} = kU^2.$$

При этом шкала прибора должна быть квадратичной. Придавая пластинам специальную форму, получают почти равномерную шкалу (нелинейную только в начальной части шкалы).

Значение вращающего момента у электростатических механизмов невелико, поэтому приборы эти предназначены для измерения относительно высоких напряжений. Подвижную часть механизма укрепляют на растяжках; отсчет, как правило, световой. На рис. 31 показан внешний вид электростатического вольтметра типа С95 с пределом измерения 30 *в* класса точности 1,5. Его входная емкость 10 *пф*, входное сопротивление 10^{10} *ом*, номинальный диапазон частот 20 *гц* — 7,5 *Мгц*, расширенный частотный диапазон 7,5—25 *Мгц*, резонансная частота 200 *Мгц*, время успокоения не более 9 *сек*.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ИЗМЕРЕНИЕ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

13. Общие сведения

Токи и напряжения радиолюбитель измеряет обычно при проверке режимов приемника, телевизора и других радиоустройств.

Постоянный ток измеряют магнитоэлектрическими амперметрами. Для этого широко используют щитовые малогабаритные приборы типов М24, М265 и др. Расширение их пределов измерения осуществляют при помощи шунтов.

Переменный ток электросети и ток звуковой частоты измеряют приборами термоэлектрической и выпрямительной систем. Термоэлектрические приборы пригодны для измерений до частот порядка сотен мегагерц.

Токи могут быть измерены и по падению напряжений на резисторах известного сопротивления.

Для измерения постоянных напряжений применяют магнитоэлектрические и электронные вольтметры. Первые точнее электронных (если не касаться цифровых), но имеют большее собственное потребление энергии. При равной же точности магнитоэлектрические приборы дешевле. Напряжение высокой частоты измеряют главным образом электронными вольтметрами.

Амперметры и вольтметры других систем применяют сравнительно редко.

14. Влияние подключения приборов на режим цепи

Очень важно, чтобы присоединение измерительного прибора не изменяло заметным образом режима испытуемой цепи.

Пусть, например, при помощи вольтметра производится измерение напряжения на колебательном контуре. Входная емкость вольтметра, будучи подключена параллельно контуру, приводит к его расстройке, а активная часть входного сопротивления вольтметра снижает добротность контура. И то и другое вызывает в общем случае уменьшение напряжения на контуре, а будь этот контур частью автогенератора, то подключение вольтметра может даже сорвать генерацию.

Как видим, в принципе изменения могут быть не только количественными, но и качественными. Последние делают измерения невозможными и поэтому совершенно недопустимы. Количественные

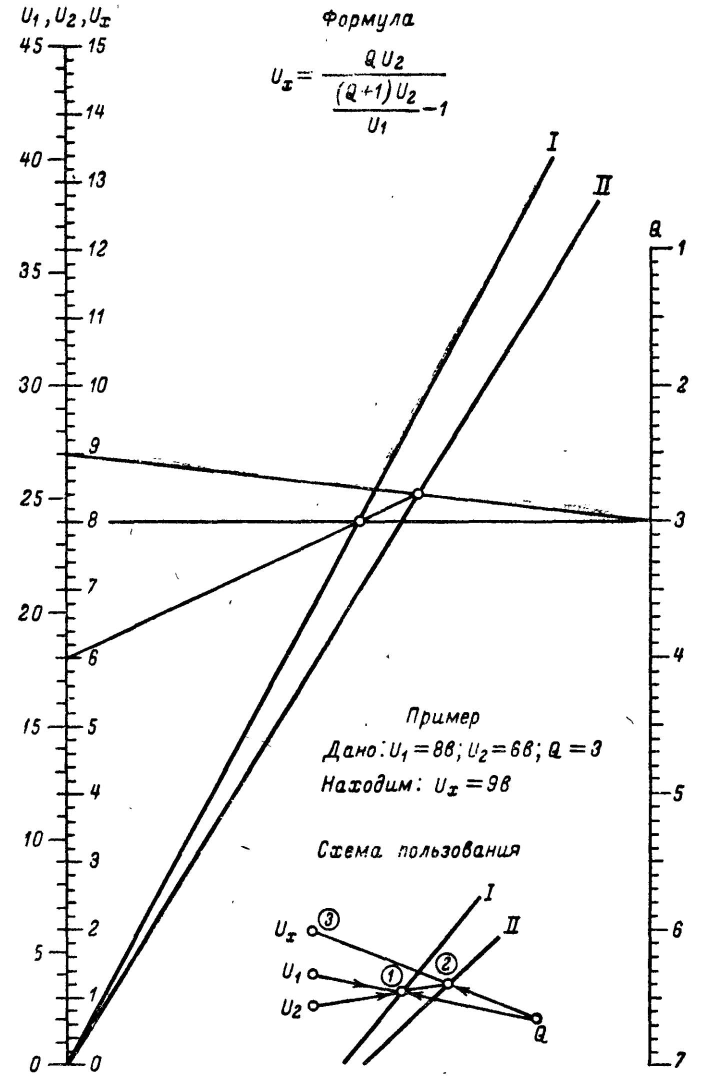


Рис. 32. Номограмма для расчета действительного напряжения цепи по показаниям вольтметров с невысоким сопротивлением.

же изменения должны быть минимальными, а это зависит не только от правильного выбора прибора, но и от рационального выполнения измерения. Например, напряжение на том же колебательном контуре можно измерить и электростатическим вольтметром, емкость которого сравнительно велика, если емкость контура при подключении вольтметра соответственно уменьшить. Полностью устранить погрешность при этом не удастся (емкость электростатического вольтметра зависит от угла поворота его подвижной части), но существенно уменьшить ее можно.

Иногда влияние подключения вольтметра на режим цепи, т. е. методическую погрешность измерения, можно учесть расчетом. В частности, это возможно при измерении постоянных напряжений в линейных цепях. Такой расчет представляет интерес в связи с тем, что режимы маломощных радиоцепей часто измеряют при помощи комбинированных приборов с относительно невысокими входными сопротивлениями (ТТ-1, Ц-52, Ц-56 и т. п.).

Предположим, что производится измерение напряжения U_x источника тока с внутренним сопротивлением $R_{\text{вн}}$. Пусть вольтметр показывает напряжение U_1. Так как входное сопротивление вольтметра $R_{\text{вх}}$ имеет конечную величину, то

$$U_1 = \frac{U_x R_{\text{вх}}}{R_{\text{вн}} + R_{\text{вх}}} < U_x.$$

Подключим затем параллельно вольтметру резистор сопротивлением R. Теперь можно считать, что вольтметр получил на той же шкале новое значение входного сопротивления

$$R'_{\text{вх}} = \frac{R R_{\text{вх}}}{R + R_{\text{вх}}}.$$

Показания вольтметра при этом изменяются (поскольку изменилась нагрузка на источник) и станут равными U_2. Решив совместно уравнения для U_1 и U_2 относительно U_x, получим:

$$U_x = \frac{U_2 R_{\text{вх}}}{\frac{U_2}{U_1}(R_{\text{вх}} + R) - R} = \frac{U_2 Q}{\frac{(Q+1)U_2}{U_1} - 1},$$

где $Q = R_{\text{вх}}/R$.

Это выражение дает возможность найти действительное напряжение U_x по результатам двух измерений вольтметрами с различными входными сопротивлениями. Соотношение между $R_{\text{вх}}$ и $R_{\text{вн}}$ при этом не оговаривается. Для облегчения расчета на рис. 32 дана номограмма.

Этот метод справедлив для любой линейной цепи, сколь бы сложной она ни была, так как всякую линейную электрическую цепь можно представить в виде эквивалентного генератора с э. д. с. U_x с последовательно включенным внутренним сопротивлением $R_{\text{вн}}$.

Рассмотренный метод двух вольтметров к цепям переменного тока применим лишь в очень ограниченной степени вследствие появления дополнительных фазовых соотношений.

15. Влияние формы кривой измеряемого тока

Переменное напряжение (ток) может быть охарактеризовано своим амплитудным (пиковым), действующим (эффективным) или средним значениями. Для симметричных напряжений среднее значение за период равно нулю. В этом случае определяют среднее значение за половину периода. Отношение действующего значения к среднему носит название коэффициента формы кривой. Для синусоиды он всегда равен 1,11. Амплитудное значение синусоиды всегда больше действующего в $\sqrt{2} = 1{,}41$ раза. Для других форм кривых эти отношения будут другими.

Обычно необходимо знать действующее значение напряжения, которое показывает энергию, заключенную в колебаниях данной формы. Известно, что мощность, выделяемая током на активном сопротивлении, пропорциональна квадрату действующего значения

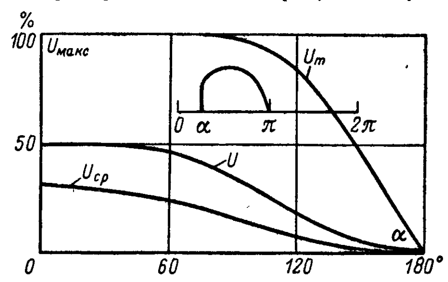


Рис. 33. Зависимость амплитудного, действующего и среднего значений тока через тиратрон от угла зажигания.

напряжения (тока). Амплитудное значение представляет интерес, когда находят максимальное мгновенное напряжение на каких-либо элементах цепи (конденсаторах, диодах и др.), а также в импульсной технике. Среднее значение есть постоянная составляющая выпрямленного сигнала.

Вольтметры разных систем реагируют на разные значения: термоэлектрические и электростатические на действующее, выпрямительные и часть электронных на среднее, другая часть электронных на амплитудное. Градуируются все вольтметры при синусоидальном напряжении, причем шкала наносится обычно в действующих значениях напряжения.

Если форма измеряемого напряжения не синусоидальна, то истолковывать показания вольтметра нужно очень осторожно. Предположим, что мы располагаем вольтметром выпрямительной системы. Такой вольтметр реагирует на среднее значение напряжения. То обстоятельство, что он градуирован в действующих значениях, при синусоиде на входе роли не играет. Если, например, к входу вольтметра приложено синусоидальное напряжение и показания вольтметра равны 100 *в*, то это говорит нам, что действующее значение напряжения 100 *в*, среднее $100/1{,}11 = 90$ *в*, амплитудное $100\sqrt{2} = 141$ *в*. Попробуем теперь измерить тем же прибором напря-

жение белого шума (дробовой шум лампы, тепловой шум резистора и т. п.). У белого шума отношение действующего значения к среднему равно 1,25. Следовательно, показания вольтметра будут меньше действующего значения в 1,25/1,11=1,13 раза, так как при градуировке вольтметра использовался поправочный коэффициент 1,11.

На рис. 33 показано, как меняются амплитудное U_m, действующее U и среднее $U_{ср}$ значения напряжения однополупериодного тиратронного выпрямителя в зависимости от угла зажигания тиратрона. Из кривых графика видно, что измерить какое-либо значение напряжения можно только прибором, реагирующим именно на это значение и в этих же значениях градуированным. О двух других значениях при этом нельзя будет сказать ничего. Этот же пример показывает, что для определенных случаев могут быть составлены графики поправочных коэффициентов к показаниям прибора.

Величина изменения показаний вольтметров при отклонении формы кривой измеряемого напряжения от синусоидальной оговаривается в технических условиях на вольтметры.

16. Вольтметры с растянутой шкалой

У вольтметров полностью используется только первая, самая чувствительная шкала. Первая треть каждой последующей шкалы перекрывается предыдущей и не используется. Резонно было бы ее исключить, а рабочую часть растянуть на всю длину шкалы.

Одно из решений этой задачи было описано В. Праховым в журнале «Радио» № 9 за 1962 г. На рис. 34, *а* показана схема вольтметра с тремя пределами измерения. Вторая и третья шкалы у него растянуты вследствие применения стабилитронов (диодов) $Д_2$ и $Д_3$. Стабилитрон $Д_1$ защищает микроамперметр от перегрузок.

Пусть $I_н$ — номинальный ток микроамперметра, а $U_{н1}$ — конечное значение первой шкалы. Тогда $R_1 + R_2 = U_{н1}/I_н$. С другой стороны, сопротивление резистора R_2 должно быть таким, чтобы создаваемое на нем током $I_н$ падение напряжения составляло примерно 0,9 от напряжения стабилизации диода $Д_1$. Тогда возможная перегрузка микроамперметра будет ограничена десятью процентами.

При пробое диода $Д_1$ в результате перегрузки цепи через резистор R_1 может протекать ток вплоть до предельного для стабилитронов. Резистор R_1 должен рассеивать соответствующую мощность.

На первом пределе измерения вольтметр работает, как обычно. После переключения на второй предел вольтметр не будет давать показаний до тех пор, пока входное напряжение не достигнет напряжения пробоя $U_{п2}$ стабилитрона $Д_2$. С этого момента через микроамперметр μA потечет ток $(U_x - U_{п2})/(R_1 + R_2)$. Если $U_{н1} = U_{п2}$, то начальная отметка второй шкалы будет соответствовать конечной отметке первой. Начальная отметка третьей шкалы будет $U_{п2} + U_{п3}$. Ее следует сделать равной конечной отметке второй шкалы.

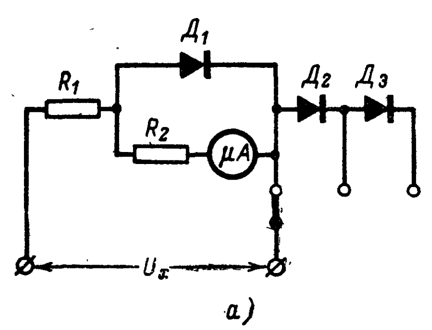
Пусть взяты стабилитроны типа Д810 с напряжением пробоя 10 *в* каждый, а $I_н = 100$ *мка*. Тогда пределы измерения будут 0—10 *в*, 10—20 *в*, 20—30 *в*. Суммарное сопротивление резисторов $R_1 + R_2 = 10/100 \cdot 10^{-6} = 100$ *ком*. Из условия $I_н R_2 = 0{,}9 U_{н1}$ найдем $R_2 = 0{,}9 \cdot 10/100 \cdot 10^{-6} = 90$ *ком*. Учитывая сопротивление микроамперметра порядка 1,5 *ком*, возьмем $R_2 = 88$ *ком*. Тогда $R_1 = 12$ *ком*. Наибольший допустимый ток через диод Д810 равен 26 *ма*. Следо-

вательно, при пробое диода $Д_1$ выделяемая в резисторе R_1 мощность $I^2R_1 = 8$ *вт.*

Если мы хотим, чтобы из каждой последующей шкалы исключалась начальная треть, то нужно, чтобы напряжение пробоя стабилитрона или группы стабилитронов, вводимых при переключении пределов, все время утраивалось. Количество пределов измерения может быть сделано, вообще говоря, любым.

Стабилитроны должны быть тщательно подобраны по напряжению пробоя. Во-первых, оно должно быть круглым числом, например 10 *в*, и, во-вторых, у всех диодов оно должно быть одинаковым или находиться в заданных отношениях.

Нужно также отметить, что при малых токах через стабилитроны их дифференциальное сопротивление в несколько раз больше, чем при номинальных. Считается, что стабилитрон удовлетворительно работает при токах от 0,5 до 1 *ма.* Поэтому большое сопротивление такого вольтметра можно получить ценой нелинейности характеристики. Чтобы совместить линейность с высоким сопротивлением, можно ввести разделительный усилитель мощности (катодный повторитель, например).



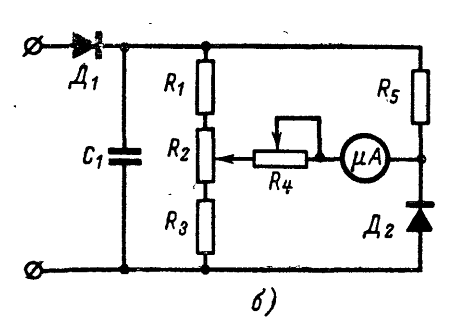


Рис. 34. Схемы вольтметров с растянутой шкалой.

а — с последовательным включением стабилитронов; *б* — мостовая.

Часто возникает необходимость в контроле какого-то напряжения, которое подвержено лишь небольшим изменениям, например, напряжения электросети, напряжения накала электронных ламп и т. п. В этом случае нужен однопредельный вольтметр, шкала которого охватывает только возможные значения напряжения. Наиболее подходит для этого мостовая схема со стабилитроном в одном плече (рис. 34, *б*). Мост питается измеряемым напряжением, индикатор (микроамперметр μA) включен в измерительную диагональ.

Обозначим напряжение стабилизации через $U_п$ и будем считать его неизменным. Мост уравновешен и ток через прибор отсутствует, если

$$\frac{U(R_3 + 0{,}5R_2)}{R_1 + R_2 + R_3} = U_п.$$

При изменении напряжения на $\pm \Delta U$ ток через прибор

$$\pm I = \frac{\Delta U}{R_4 + (R_1 + 0{,}5R_2)\left(1 + \frac{R_4}{R_3 + 0{,}5R_2}\right)}.$$

Здесь R_4 обозначает полное сопротивление измерительной диагонали моста, равное сумме сопротивлений микроамперметра и добавочного резистора.

Предположим, что нам нужно контролировать напряжение электросети 220 *в*, причем желательна шкала с пределами 200—240 *в*. А для этой схемы мы располагаем стабилитроном Д810 и микроамперметром М24 с током полного отклонения 100 *мка* и внутренним сопротивлением 1,5 *ком*.

Прежде всего переменное напряжение выпрямляется (диод $Д_1$ и конденсатор C_1 на рис. 34, *б*). Так как потребляемый ток невелик (несколько миллиампер), напряжение на конденсаторе будет близким к амплитудному значению напряжения электросети, около 300 *в*. Мост должен быть в равновесии при напряжении электросети 200 *в*, что соответствует напряжению питания моста (напряжение на конденсаторе) около 280 *в*. Примем ток через ветвь $R_1R_2R_3$ примерно 1 *ма*. При этом суммарное сопротивление этой ветви будет около 280 *ком*. На сопротивлении $R_3 + 0{,}5R_2$ должно падать напряжение 10 *в*. Тогда $R_3 + 0{,}5R_2 = 10$ *ком*. Из-за неточности подбора сопротивлений резисторов и напряжения стабилизации стабилитрона предусмотрим регулировку положения равновесия в пределах 7% номинального напряжения. Отсюда $R_3 = 6{,}8$ *ком*, $R_2 = 6{,}8$ *ком*, $R_1 = 280 - 13{,}6 = 266{,}4$ *ком*. Для R_1 берем ближайшее значение по 10%-ной шкале резисторов 270 *ком*.

Чтобы найти R_4, подставим в приведенное выше уравнение $\Delta U = 40$ *в*, $I = I_н = 100$ *мка* и найденные сопротивления резисторов. В результате получим $R_4 = 4{,}55$ *ком*. Так как сопротивление самого микроамперметра 1,5 *ком*, то последовательно с ним нужно включить резистор переменного сопротивления 3,3 или 4,7 *ком*.

Ток через стабилитрон должен быть 4—5 *ма*, поэтому сопротивление резистора R_3 должно быть 68 *ком*. Его мощность рассеяния 2 *вт*.

Стрелка прибора при напряжении электросети 220 *в* будет отклонена ровно на половину шкалы. При 200 *в* стрелка будет на начальной, а при 240 *в* на конечной отметке. Отметки шкалы оцифровываются согласно этим данным. Если микроамперметр с нулем посредине, то считают равновесие моста для 220 *в*.

По такой схеме удобно конструировать вольтметры, встраиваемые в радиоаппаратуру для контроля режимов ламп. Это одно из основных применений схемы, потому что ее собственное потребление довольно велико (5—6 *ма*).

17. Электронные вольтметры постоянного тока

По своему назначению электронные вольтметры разделяются на приборы для измерений постоянных и переменных напряжений. Они выпускаются с классами точности 1,5; 2,5; 4,0; 6,0 и 10,0. Входное сопротивление их обычно составляет 11 *Мом*.

Ламповые вольтметры. Такой вольтметр состоит из входного делителя напряжения, лампового усилителя мощности и выходного индикаторного прибора. Усилитель согласует высокое сопротивление входной цепи с малым сопротивлением индикаторного прибора, преобразуя приложенное к входу усилителя напряжение в ток, протекающий через измерительный механизм индикаторного прибора (как правило, магнитоэлектрической системы). Коэффициент усиления усилителя по напряжению близок к единице, а по мощности составляет от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч (в зависимости от типа усилителя).

В простейшем случае усилитель представляет собой параллельно-балансный каскад на двойном триоде с нагрузками в катодных цепях (рис. 35), отличающийся малой зависимостью выходного напряжения

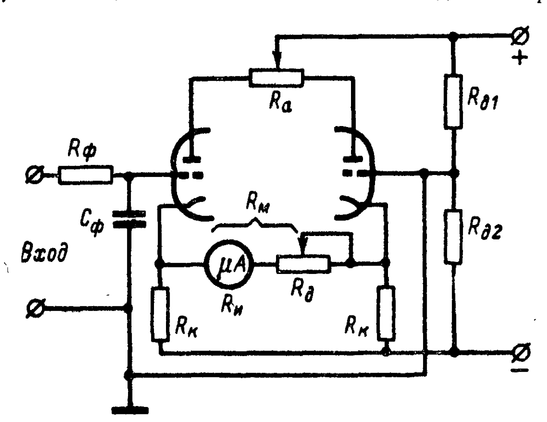


Рис. 35. Схема однокаскадного усилителя лампового вольтметра постоянного тока.

от изменения питающих напряжений. Индикаторный прибор μA включен между катодами триодов. Установка нуля производится изменением сопротивлений в анодных цепях потенциометром $R_а$. Заметим, что этот потенциометр может быть с тем же успехом включен в катодные цепи. Источник анодного напряжения не должен быть заземлен, так как в этом усилителе заземлена сетка одного из триодов.

Зависимость тока $I_и$ через индикаторный прибор от напряжения входа $U_{вх}$ определяется следующим выражением:

$$I_и = \frac{SU_{вх}}{2 + R_м\left(S + \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_к}\right)} \approx \frac{SU_{вх}}{2 + R_м S}.$$

При проектировании усилителя известны сопротивление и ток отклонения индикаторного прибора. Если этот ток не более 300 *мка*, то следует применить лампу типа 6Н2П; она экономична и, кроме того, имеет большой статический коэффициент усиления μ. А стабильность коэффициента передачи катодного повторителя пропор-

циональна величине μ. Если же ток больше 300 *мка*, то лучше использовать лампу типа 6Н1П. По соображениям линейности анодный ток покоя каждого триода должен быть больше утроенного номинального тока индикатора прибора. Подставляя в предыдущее уравнение значение крутизны триода S при токе покоя I_0 и параметры индикаторного прибора, найдем то напряжение входа, при котором стрелка индикатора даст полное отклонение.

Однако конечное значение шкалы на первом пределе измерения при таком усилителе не может быть принято менее 1 *в*, так как напряжение шумов усилителя составляет примерно 10 *мв*. Поэтому для уменьшения чувствительности вольтметра последовательно с индикаторным прибором включают резистор $R_д$, причем для регулировки чувствительности предусматривают резистор переменного сопротивления.

Сопротивление катодных резисторов $R_к$ должно быть по 100—200 *ком*, а если возможно, то и больше. Делитель из резисторов $R_{д1}$ и $R_{д2}$ рассчитывают так, чтобы падение напряжения на резисторе $R_{д2}$ составляло $R_к I_0$.

Сопротивление потенциометра $R_а$ составляет примерно 40% от внутреннего сопротивления триодов R_i (с тем, чтобы покрыть возможный их разброс).

На входе усилителя включен фильтр $R_ф C_ф$ нижних частот, который препятствует попаданию на сетку триода переменной составляющей измеряемого напряжения, а резистор $R_ф$, кроме того, предохраняет прибор от повреждения при случайном подключении к входу большого положительного напряжения.

Усилитель, собранный по рассмотренной схеме на двойном триоде типа 6Н2ПЕ с хорошей симметрией триодов (анодные токи 2,26 и 2,25 *ма*, крутизна 1,9 и 1,85 *ма/в*) и индикаторном приборе типа М265 с током полного отклонения 100 *мка* и сопротивлением 450 *ом*, показал следующее. Без добавочного сопротивления $R_д$ к индикаторному прибору полное отклонение стрелки получалось при входном напряжении 0,376 *в* (что совпадает с расчетом). После прогрева усилителя отклонения стрелки от нуля (в пересчете на вход) составляли $\pm$ 1,5 *мв*. Примерно такой же уход нуля наблюдался и при изменении питающих напряжений на $\pm$ 10%. Но значительно заметнее влияют изменения напряжений питания на чувствительность вольтметра. При изменении напряжения источника анодного питания на $\pm$ 10% коэффициент передачи по напряжению изменялся на $\pm$ 1,2%, а изменения напряжения накала на $\pm$ 10% изменяли коэффициент передачи на $\pm$ 2,5%.

Если лампа не подобрана, то нижний предел изменения не следует брать меньше 1 *в*.

Усилитель обеспечивает отклонение стрелки прибора на всю шкалу на одном, нижнем, пределе измерения. Расширение пределов измерения осуществляется либо путем ступенчатого изменения сопротивления $R_д$, либо делением измеряемого напряжения на входе усилителя. Первый способ при однокаскадном усилителе почти не используют, так как такой усилитель линеен лишь в относительно небольших пределах.

Суммарное сопротивление R входного делителя определяется сеточным током лампы. У приемно-усилительных ламп ток сетки составляет $5 \cdot 10^{-8}$—10^{-10} *а*. Протекая через делитель, этот ток создает на нем падение напряжения, которое является частью напря-

жения смещения лампы. При подключении вольтметра к испытуемой цепи или при переключении пределов измерения сопротивление в цепи сетки меняется, следовательно, при заметном сеточном токе изменяется и напряжение смещения на сетку лампы, что вызывает смещение нуля прибора. Чтобы на первой шкале 0—1 *в* при токе сетки 10^{-9} *а* смещение нуля не превышало 1%, сопротивление делителя должно быть порядка 10 *Мом*.

При изготовлении единичного экземпляра вольтметра можно подобрать экземпляр лампы с малым сеточным током и повысить сопротивление делителя до 25—40 *Мом*. Подбирать лампу можно на том же вольтметре. Для этого, включив вольтметр на нижний предел измерения ($R = 25 \div 40$ *Мом*), замыкают сетку лампы на корпус и оставляют ту лампу, при которой смещение нуля наименьшее.

Сопротивления резисторов делителя можно рассчитать, пользуясь следующей формулой:

$$R_n = RU_1\left(\frac{1}{U_n} - \frac{1}{U_{n+1}}\right),$$

где R_n — сопротивление резистора, соответствующего n-му пределу измерения;
R — суммарное сопротивление делителя;
U_1 — напряжение первого предела измерения;
U_n — напряжение n-го предела измерения;
U_{n+1} — напряжение следующего, $(n+1)$-го, предела измерения.

При вычислении сопротивления последнего резистора, соответствующего высшему пределу измерения, нужно полагать $U_{n+1} = \infty$ (следовательно, $1/U_{n+1} = 0$).

Пусть, например, $R = 10$ *Мом*, $U_1 = 3$*в*, $U_2 = 10$ *в*, $U_3 = 30$ *в*, $U_4 = 100$ *в*, $U_5 = 300$ *в*. Для первого предела измерения $U_n = U_1 = 3$ *в*, а $U_{n+1} = U_2 = 10$ *в*, поэтому сопротивление первого резистора $R_1 = 1 \cdot 10^7 \cdot 3\,(^1/_3 - ^1/_{10}) = 7$ *Мом*. Для второго предела $U_n = U_2 = 10$ *в*, а $U_{n+1} = U_3 = 30$ *в* и сопротивление второго резистора $R_2 = 1 \cdot 10^7 \cdot 3\,(^1/_{10} - ^1/_{30}) = 2$ *Мом*. Для третьего предела $U_n = U_3 = 30$ *в*, а $U_{n+1} = U_4 = 100$ *в* и $R_3 = 1 \cdot 10^7 \cdot 3\,(^1/_{30} - ^1/_{100}) = 700$ *ком*. Для четвертого предела $U_n = U_4 = 100$ *в*, а $U_{n+1} = U_5 = 300$ *в* и $R_4 = 1 \cdot 10^7 \cdot 3\,(^1/_{100} - ^1/_{300}) = 200$ *ком*. Для пятого предела $U_n = U_5 = 300$ *в*, а $U_{n+1} = \infty$ и $R_5 = 1 \cdot 10^7 \cdot 3 \cdot ^1/_{300} = 100$ *ком*.

В усилителе с делителем на входе резистор фильтра $R_ф$ может быть включен как последовательно с делителем, так и после делителя. В первом случае через резистор $R_ф$ не протекает ток сетки, но зато на сетку лампы поступает в $1 + R_ф/R$ раз меньшее напряжение сравнительно со вторым вариантом, что должно быть учтено при расчете.

Резисторы для делителя подбирают с отклонением от номинального значения не более ± 1%. Лучше всего применять измерительные и прецизионные резисторы типов БЛП, МВС и др.

В однокаскадном усилителе требование малого сеточного тока вступает в противоречие с требованием низкого выходного сопротивления. Для снижения тока сетки нужно, например, уменьшать анодный ток, но с уменьшением последнего увеличивается выходное сопротивление усилителя.

Выходное сопротивление усилительного каскада в значительной мере определяется параметрами лампы. Например, выходное сопротивление катодного повторителя $R_{вых} \approx 1/S$, где S — крутизна характеристики лампы. При $S = 1$ *ма/в* выходное сопротивление $R_{вых} = 1$ *ком*, т. е. оно примерно того же порядка, что и сопротивление нагрузки $R_м$. Выходное напряжение делится между $R_{вых}$ и $R_м$. Но параметры лампы не отличаются длительной стабильностью, поэтому как чувствительность вольтметра, так и положение нуля на его шкале со временем меняются.

В современных электронных вольтметрах применяют двухкаскадные усилители с глубокой отрицательной обратной связью. Для лучшей стабильности нуля прибора каскады усилителя включают по балансной схеме (рис. 36).

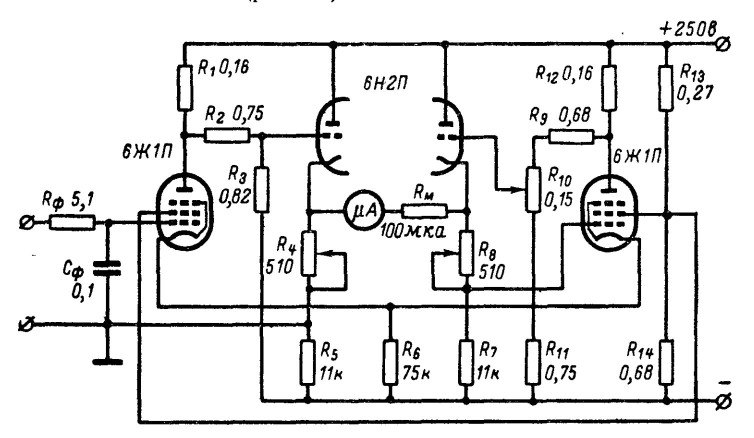


Рис. 36. Схема двухкаскадного балансного усилителя лампового вольтметра постоянного тока.

При отрицательной обратной связи часть выходного напряжения $\beta U_{вых}$ усилителя подается на его же вход в противофазе. При этом общий коэффициент усиления уменьшается, но во столько же раз уменьшается и выходное сопротивление усилителя, а стабильность и входное его сопротивление увеличиваются.

Обозначим коэффициент усиления усилителя без обратной связи через K_0, а коэффициент обратной связи, т. е. долю выходного напряжения, подаваемую на его вход, через β. Напряжение на входе усилителя равно разности измеряемого напряжения и напряжения обратной связи, т. е. $u = U_{вх} - \beta U_{вых}$. Будучи усилено в K_0 раз, оно становится $(U_{вх} - \beta U_{вых}) K_0 = U_{вых}$. Отсюда коэффициент усиления усилителя с обратной связью

$$K_{о.\,с} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{K_0}{1 + K_0\beta}.$$

Если $K_0\beta \gg 1$, то $K_{о.\,с} = 1/\beta$.

Цепь обратной связи выполняется из стабильных элементов, поэтому коэффициент усиления усилителя с отрицательной обрат-

ной связью очень стабилен. Изменения параметров ламп на него почти не оказывают влияния, так как значение K_0 при большой величине $K_0\beta$ в выражение для $K_{о.\,с}$ не входит. Точнее говоря, относительное изменение коэффициента усиления $K_{о.\,с}$ оказывается в $1+K_0\beta$ раз меньше вызвавшего его изменения коэффициента усиления $\Delta K_0/K_0$ самого усилителя

$$\frac{\Delta K_{о.\,с}}{K_{о.\,с}}=\frac{1}{1+K_0\beta}\,\frac{\Delta K_0}{K_0}.$$

Если $K_0\beta=100$, то изменение коэффициента усиления $K_{о.\,с}$ составит примерно 1% от изменения K_0.

Последовательная отрицательная обратная связь увеличивает входное сопротивление в $1+K_0\beta$ раз и во столько же раз уменьшает выходное сопротивление усилителя. Очевидно, что наибольшее возможное значение $\beta=1$ (когда все выходное напряжение усилителя поступает на его вход). Чтобы выполнить условие $K_0\beta\gg 1$, нужно иметь усилитель с большим коэффициентом усиления K_0. Поэтому в усилителе, схема которого была приведена на рис. 36, в первых каскадах предпочтительнее применение пентодов, нежели триодов. Коэффициент усиления каждого (левого и правого) из усилителей

$$K_0\approx S_1R_1\frac{R_3}{R_2+R_3}\,\frac{1}{1+\dfrac{1}{S_2R_5}+\dfrac{1}{S_2R_{i2}}},$$

где S_1 — крутизна пентода;

S_2 — крутизна триода;

R_{i2} — внутреннее сопротивление индикаторного прибора.

Значение K_0 зависит в значительной мере от режима пентода и при напряжении на его экранирующей сетке $+15$ *в* и анодном сопротивлении около 10 *Мом* составляет 400—600. Однако для расширения границ линейности напряжение на экранирующей сетке устанавливают в 30—80 *в* и при анодном сопротивлении в несколько сотен килоом получают коэффициент усиления 100—150, что вполне достаточно.

При помощи делителей R_2R_3 и $R_9R_{10}R_{11}$ начальные потенциалы точек подключения индикатора устанавливают равными потенциалу входного зажима. К сожалению, при этом теряется часть усиления в связи с делением измеряемого напряжения в отношении $R_3/(R_2+R_3)$. Чтобы избежать этого, анод первой лампы соединяют с сеткой второй непосредственно, а потенциал катода второй лампы повышают при помощи стабилитрона, включенного последовательно с ее катодным резистором. Другими словами, делитель из сеточной цепи лампы переносят в цепь ее катода, причем роль верхнего плеча R_2 делителя играет стабилитрон, в связи с чем коэффициент усиления не уменьшается. Так сделано, например, в вольтметре типа ВК7-9 (рис. 37). Входное сопротивление этого вольтметра при измерении постоянных напряжений определяется входным делителем и составляет 16,56 *Мом*. Переключения пределов измерения в нем до предела 0—30 *в* включительно осуществляются при помощи системы резисторов, включаемых последовательно с индикатором. При работе на пределах 0—100 *в*, 0—300 *в* и 0—1000 *в* измеряемое напряжение ослабляется соответственно в 3,3; 10 и 33 раза. Основная погрешность вольт-

метра при измерении постоянных напряжений составляет ± 2,5% от конечного значения шкалы индикатора.

Стабилитроном можно было бы заменить и нижнее плечо R_3 делителя в цепи сетки, но тогда сравнительно большой ток стабилитрона вызвал бы значительное снижение потенциала анода первой

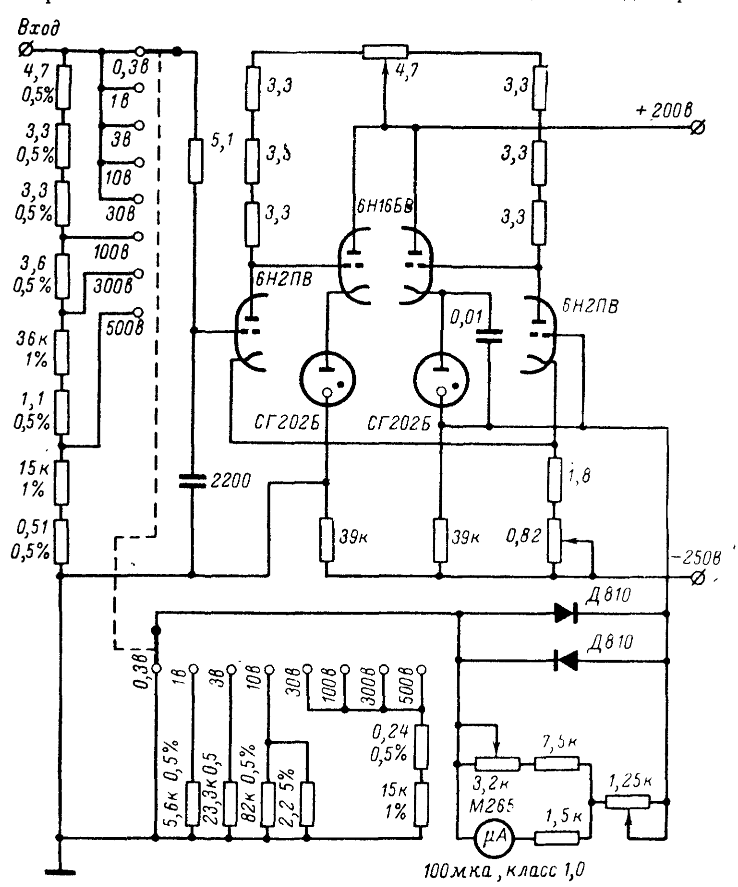


Рис. 37. Схема вольтметра ВК7-9 при измерении напряжений постоянного тока.

лампы. Иногда нижним плечом делителя в сеточной цепи служит динамическое сопротивление дополнительной лампы, но это усложняет схему вольтметра.

Вернемся теперь к схеме усилителя, показанной на рис. 36. Если из схемы исключить резисторы R_4 и R_8, а так часто и делают, то коэффициент передачи усилителя по напряжению составит 0,99—

0,997, т. е. он будет несколько меньше единицы. Но этого уже достаточно, чтобы на выход усилителя можно было включать низкоомные вольтметры без нарушения их градуировки. Усилитель при этом играет роль трансформатора сопротивлений, повышая действующее сопротивление вольтметра до десятков мегом.

При помощи резисторов R_4 и R_8 можно уменьшить глубину обратной связи ровно настолько, чтобы коэффициент передачи усилителя по напряжению был точно равен единице. Эти резисторы играют еще и другую роль. Связь между усилительными каскадами осуществляется через резистор R_6, включенный в общую катодную цепь их ламп. При этом они работают не вполне симметрично, так как изменения напряжения на катоде левого (по схеме) триода больше, чем на катоде правого триода лампы 6Н2П. Однако эта несимметрия невелика, и если обе лампы (пентоды) усилительных каскадов одинаковы по своим параметрам, то отношение напряжения, действующего между управляющей сеткой и катодом левого (по схеме) пентода 6Ж1П, к напряжению на ее катоде, представляющему напряжение сетка — катод правого пентода четвертой лампы, равно:

$$\frac{U_{\text{с.к1}}}{U_{\text{к}}} = 1 + \frac{1}{SR_6}.$$

В рассматриваемом случае это около 1%. Если бы первая и четвертая лампы вместо пентодов были триоды, то

$$\frac{U_{\text{с.к1}}}{U_{\text{к}}} = 1 + \frac{2}{\mu} + \frac{R_1 + R_{i1}}{\mu R_6},$$

что довольно близко к предыдущему выражению.

Для строгой симметрии выходных напряжений нужно, чтобы коэффициент усиления второго (правого) усилителя был больше коэффициента усиления левого во столько раз, во сколько напряжение между управляющей сеткой и катодом входной лампы (левый по схеме пентод 6Ж1П) больше напряжения на ее катоде. Этого легко добиться, регулируя глубину обратной связи правого усилителя резистором R_8. Но, повторяем, при не очень высоких требованиях к вольтметру резисторы R_4 и R_8 можно из схемы исключить.

У изготовленного по схеме на рис. 36 вольтметра колебания указателя вокруг нулевого положения составляли ± 0,6 *мв*. Изменение напряжения анодного питания на ± 10% не влияли на нулевое положение указателя, а коэффициент передачи менялся на 0,8%. Изменение напряжения накала на ± 10% смещало нуль на ± 3 *мв*, а коэффициент передачи менялся на ± 2,5% (на шкале 0—120 *мв*).

Усилитель, охваченный отрицательной обратной связью, имеет линейную амплитудную характеристику в очень широкой области изменения входного напряжения. Это дает возможность до напряжений порядка 30—50 *в* изменять пределы измерения переключением добавочных резисторов к индикатору. Поскольку сопротивления добавочных резисторов невелики, они могут быть проволочными, т. е. более точными и стабильными. Входной делитель включают в схему вольтметра при измерениях напряжений выше 30—50 *в*. Такой делитель может быть двух- или трехступенчатым.

Транзисторные вольтметры. Усилитель мощности вольтметра может быть не только ламповым, но и транзисторным. Но если

входной величиной первого является напряжение, то второго — ток. Транзисторный усилитель и выходной индикаторный прибор, рассматриваемые совместно, эквивалентны измерителю тока, у которого чувствительность выше чувствительности исходного прибора в число раз, равное коэффициенту усиления усилителя. Расширение пределов измерения транзисторного вольтметра осуществляется при помощи добавочных сопротивлений, включаемых последовательно с входом усилителя. Их расчет производится по формулам для магнитоэлектрических вольтметров (стр. 40), в которые вместо сопротивления измерителя подставляют входное сопротивление усилителя (по порядку величины они одинаковы).

Современные транзисторные вольтметры не уступают по величине входного сопротивления ламповым и с успехом применяются для измерений в цепях радиоустройств. В большинстве случаев вполне достаточно, чтобы входное сопротивление вольтметра составляло 200 *ком/в.* При индикаторном приборе с током полного отклонения 100—200 *мка* для этого нужно усиление по току 20—40. Такое усиление можно получить от одного параллельно-балансного каскада. При более грубом приборе необходим двухкаскадный усилитель.

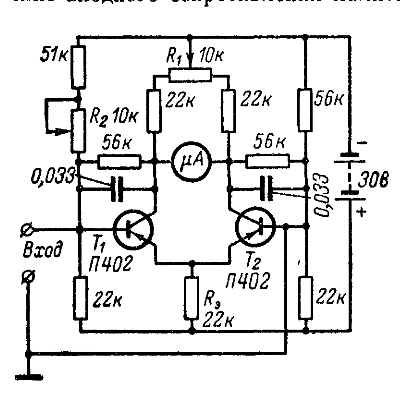


Рис. 38. Схема однокаскадного балансного усилителя транзисторного вольтметра.

Недостатком транзисторов является зависимость их параметров от температуры. Поэтому в транзисторных усилителях вопросы стабилизации стоят более остро, чем в ламповых. Для повышения стабильности принимают меры конструктивного порядка (радикальная из них — термостатирование) и широко используют отрицательные обратные связи (часто усиленные).

В транзисторных усилителях для вольтметра постоянного тока наряду с низкочастотными находят применение и высокочастотные транзисторы типов П401, П402, П403, П416 и др. Это объясняется тем, что коэффициент усиления по току β у них больше, а собственный шум меньше, чем у низкочастотных. При большем же значении β глубину отрицательной обратной связи при том же усилении каскада можно увеличить и тем самым повысить стабильность усилителя. Для усилителей с глубокой отрицательной обратной связью в большинстве случаев допустимо отбирать транзисторы только по максимальному значению β, не обращая внимания на различия в температурных коэффициентах их обратных коллекторных токов.

На рис. 38 приведена схема однокаскадного транзисторного усилителя с параллельной отрицательной обратной связью. Преимущество обратной связи параллельного вида заключается в том, что она снижает входное сопротивление усилителя и тем самым увеличивает чувствительность усилителя по напряжению.

Чтобы получить хорошую стабильность усилителя без потери чувствительности, в общую эмиттерную цепь включен резистор $R_э$. На коэффициент усиления каскада он не влияет, потому что прямые токи обоих транзисторов протекают через него в противофазе и не вызывают на нем никакого падения напряжения. Обратные же токи коллекторов протекают через этот общий эмиттерный резистор в фазе, и поэтому можно считать, что в эмиттерную цепь каждого транзистора как бы включено сопротивление, превышающее общее эмиттерное вдвое. А чем больше отношение сопротивления в эмиттерной цепи к сопротивлению в базовой, тем выше стабильность усилителя.

Такой усилитель был собран на транзисторах типа П402, со значениями β порядка 190. В качестве индикаторного прибора использовался микроамперметр М265 со шкалой 0—100 *мка* и сопротивлением 450 *ом*. Коэффициент усиления по току был равен 50, что обеспечивало входное сопротивление вольтметру 500 *ком/в*. Сопротивление входа в 14,7 *ком* было доведено до 15 *ком* последовательным включением резистора сопротивлением 300 *ом*, чтобы шкала вольтметра на первом пределе измерения была 0—30 *мв*.

Усилитель потребляет от источника питания ток 1,3 *ма*. Увеличение или уменьшение напряжения питания на 10% изменяет коэффициент усиления по току соответственно на +2 и —2,5% от конечного значения шкалы и вызывает отклонение указателя от нуля на $+2{,}6 \cdot 10^{-8}$ и $-1{,}8 \cdot 10^{-8}$ *а*. Температурный коэффициент усиления по току составляет 0,1% на 1°С.

Для повышения стабильности вольтметра транзисторы надо смонтировать в медной коробке, обмотанной снаружи тремя слоями асбестовой нити, и питать усилитель от сети переменного тока через стабилизатор напряжения. При открытом же монтаже транзисторов и питании усилителя от батарей целесообразно снизить вдвое чувствительность или же, подобрав транзисторы с возможно близкими обратными коллекторными токами, уменьшить сопротивления резисторов делителей в цепях баз и сопротивления в цепи обратной связи. Отметим, что увеличение сопротивления индикатора тоже уменьшает коэффициент усиления.

Как и всякий другой, рассматриваемый балансный каскад на транзисторах имеет два органа регулировки нуля. Потенциометр R_1 служит для уравнивания напряжений на коллекторах при замкнутых накоротко базах, о чем судят по отсутствию отклонения указателя индикаторного прибора. При наличии во входной цепи добавочных сопротивлений нужно предусматривать специальную кнопку для непосредственного замыкания баз или, в крайнем случае, производить регулировку на низшем пределе измерения, когда добавочное сопротивление имеет наименьшее значение. Если же эту операцию выполнять при большом добавочном сопротивлении, то равенство коллекторных напряжений может быть установлено и при разных напряжениях баз. При помощи потенциометра R_2 производят установку равных токов баз при разомкнутом входе.

Эти две регулировки в какой-то мере взаимосвязаны, поэтому при первоначальной наладке усилителя их приходится выполнять поочередно несколько раз до тех пор, пока индикаторный прибор будет показывать отсутствие тока как при замкнутых накоротко базах, так и при разомкнутой входной цепи. Для установки же нуля при эксплуатации вольтметра достаточно одного потенциометра R_2.

Практика показывает, что, будучи однажды установленной, нулевая разность коллекторных напряжений остается долгое время неизменной.

Для вольтметров с входным сопротивлением более 500 *ком/в* необходимы двухкаскадные усилители. Однако стабильность двухкаскадного усилителя без принятия специальных мер не может быть

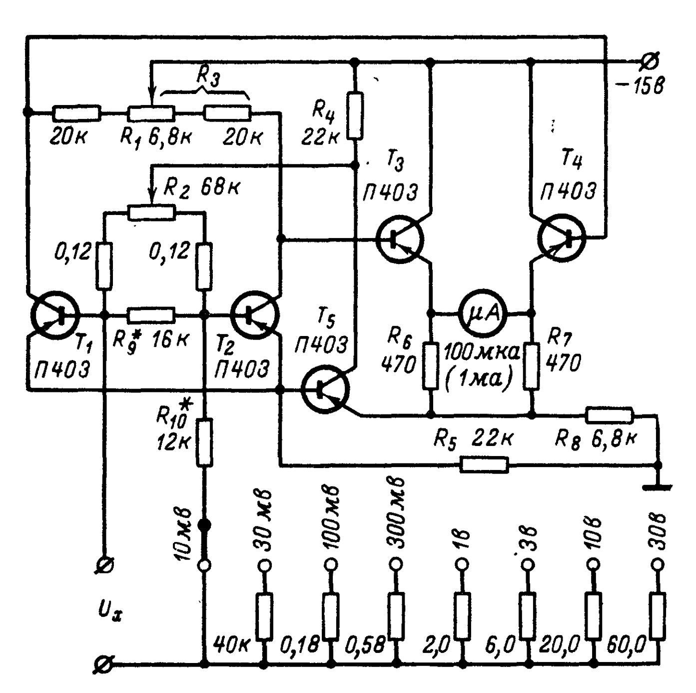


Рис. 39. Схема двухкаскадного транзисторного усилителя с усиленной отрицательной обратной связью.

лучше, чем однокаскадного. Одной из таких мер является поддержание напряжений эмиттер — коллектор входных транзисторов неизменными (не зависимыми от изменения их коллекторных токов) путем отрицательной обратной связи, осуществляемой через дополнительный каскад усиления (транзистор T_5 на рис. 39). При помощи этого каскада напряжения эмиттер — коллектор транзисторов поддерживаются равными падениям напряжений на сопротивлениях резисторов R_6 и R_7, поскольку напряжениями эмиттер — база транзисторов T_3, T_4 и T_5 можно пренебречь из-за их незначительности.

Рассмотрим действие обратной связи при работе только каких-либо одних половин балансных каскадов усилителя, например

транзисторов T_2 и T_3. Пусть коллекторный ток транзистора T_2 возрастет вследствие, например, повышения температуры. Падение напряжения на резисторе R_3 при этом увеличится, а напряжение эмиттер — база транзистора T_3 (эмиттерного повторителя) уменьшится. Тем самым уменьшится падение напряжения на резисторах R_6 и R_8 нагрузки эмиттерного повторителя T_3. Так как $R_8 \gg R_6$, то практически измеряемое напряжение выделится на резисторе R_8. Заметим, что для этого напряжение батареи питания выбирается довольно высоким (в этом усилителе оно 15 *в*).

При уменьшении падения напряжения на резисторе R_8 увеличивается напряжение эмиттер—база транзистора T_5. Это ведет к возрастанию его коллекторного тока и увеличению падения напряжения на резисторе R_4, а последнее в свою очередь к уменьшению напряжения эмиттер—база транзистора T_2 и, следовательно, к уменьшению его коллекторного тока приблизительно до первоначальной величины.

Когда работают обе половины балансных каскадов, указанная цепь отрицательной обратной связи подавляет температурные изменения коллекторных токов, но не влияет на коэффициент усиления. Действительно, при изменении температуры коллекторные токи транзисторов T_1 и T_2 либо одновременно возрастают, либо одновременно уменьшаются, в связи с чем на резисторе R_5 (и резисторе R_8) появляется некоторое падение напряжения. Измеряемые же токи протекают через этот резистор в противофазе и никакого падения напряжения на нем не создают.

Температурный эффект самого транзистора T_5 также способствует температурной стабилизации схемы. В самом деле, при повышении температуры коллекторный ток транзистора T_5 и создаваемое этим током падение напряжения на резисторе R_4 увеличиваются, противодействуя увеличению коллекторных токов транзисторов T_1 и T_2.

Усилитель по схеме на рис. 39 был собран на транзисторах типа П403 с $\beta = 46$ и $I_{к.о} = 0,8$ *мка* у транзистора T_1, с $\beta = 48$ и $I_{к.о} = 0,8$ *мка* у транзистора T_2, с $\beta = 39$ и $I_{к.о} = 0,9$ *мка* у транзистора T_3, с $\beta = 40$ и $I_{к.о} = 0,9$ *мка* у транзистора T_4 и с $\beta = 42$ и $I_{к.о} = 1$ *мка* у транзистора T_5. Входное сопротивление усилителя около 16 *ком*, а его номинальный входной ток (при индикаторе с током полного отклонения 100 *мка*) равен 0,25 *мка*. При помощи последовательного R_{10} и параллельного R_9 резисторов входное сопротивление вольтметра на первом пределе измерения (0—10 *мв*) сделано равным 20 *ком*.

Верхний предел измерения принят в данном случае равным 30 *в*. При дальнейшем его увеличении потребовались бы резисторы слишком большого сопротивления, а они не могут быть точными. Выйти из этого положения можно, применив внешний делитель с коэффициентом деления 1 : 100 (9,9 *Мом* и 100 *ком*). Это позволит на шкалах 0—1 *в*, 0—3 *в* и 0—10 *в* измерять напряжения соответственно до 100, 300 и 1000 *в*.

Температурные изменения положения нуля и коэффициента усиления вольтметра незначительны. Отклонение же напряжения питания от номинального значения на ± 10% вызывает измеиение коэффициента усиления примерно на ± 2%, а это значит, что для вольтметра необходимо стабилизированное питание.

18. Электронные вольтметры переменного тока

В электронных вольтметрах переменного тока измеряемое напряжение при помощи детектора преобразуется в постоянный ток, протекающий через индикаторный прибор, который градуируют в единицах напряжения. В зависимости от рода детектирования напряжения различают вольтметры с анодным, сеточным и диодным детектированием. В современных вольтметрах применяется преимущественно диодное детектирование. Бóльшая часть вольтметров относится либо к типу усилитель-детектор, либо к типу детектор-усилитель. Их рассмотрением мы и ограничимся.

Вольтметры типа усилитель-детектор (вольтметры среднего значения). Структурная схема вольтметра этого типа содержит в общем случае входной частотно независимый делитель напряжения, катодный повторитель с делителем напряжения на выходе, широкополосный усилитель, диодный мостовой детектор и индикаторный прибор *И* (рис. 40, *а*).

Измеряемое напряжение до 1—3 *в* поступает непосредственно на управляющую сетку лампы катодного повторителя, а переключение пределов измерения производится при помощи делителя в его выходной цепи. Так как делитель низкоомный, коэффициент деления не зависит от частоты до частот в десятки и сотни килогерц. Например, если сопротивление нижнего плеча делителя $R_2 = 2$ *ком*, а входная емкость следующего каскада (с емкостью монтажа) 10 *пф*, то на частоте 100 *кгц* емкостное сопротивление будет еще превышать сопротивление плеча делителя в 100 раз. Напряжения, более высокие чем 0,3—1 *в*, перегружают усилитель, и для них предусматривается входной делитель с коэффициентом деления 1 : 100 или 1 : 1000 (другие коэффициенты деления встречаются реже).

Входные делители по необходимости собирают из резисторов большого сопротивления. Чтобы коэффициент деления делителя не зависел от частоты, действие входной емкости усилителя $C_{вх}$ и емкости монтажа $C_м$ компенсируют при помощи конденсатора C_1, включаемого в верхнее плечо делителя. Поэтому эти делители называются компенсированными. Трудности компенсации многоступенчатых делителей приводят к тому, что при необходимости переключать на входе несколько пределов измерения часто предпочитают для каждого предела иметь свой делитель (рис. 40, *б*).

Если постоянные времени обоих плеч делителя одинаковы, т. е. $R_1C_1 = R_2(C_2 + C_{вх} + C_м)$, то коэффициент передачи компенсированного делителя теоретически не зависит от частоты

$$\frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Практически же это оправдывается до нескольких сотен килогерц, так как на более высоких частотах начинают сказываться распределенные емкости резисторов, зависимость входной емкости усилителя от частоты и т. п. Более сложные схемы компенсации, однако, позволяют строить частотно независимые делители до частот в несколько мегагерц.

Чтобы заметно не увеличивать общую входную емкость вольтметра, емкость конденсатора C_1 выбирают возможно меньшей. Обычно для этого используют подстроечный конденсатор, позволяю-

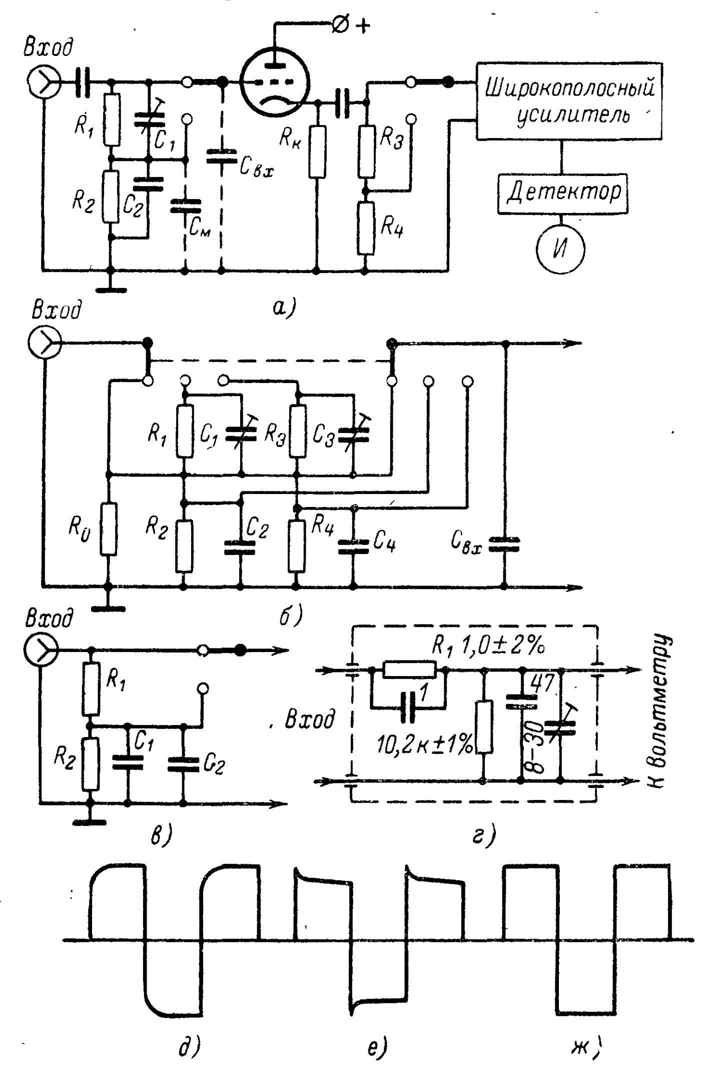


Рис. 40. Схемы электронных вольтметров переменного тока.

а — функциональная блок-схема; *б* — входная цепь с переключением компенсированных делителей; *в* — компенсированный делитель с емкостью только в нижнем плече; *г* — схема выносного делителя вольтметра В3-3; *д* — импульсы на выходе вольтметра при недостаточной емкости конденсатора C_1; *е* — импульсы на выходе при чрезмерно большой емкости C_1; *ж* — импульсы при правильно скомпенсированном делителе.

щий регулировать компенсацию. Иногда конденсатор C_1 исключают из схемы (остается только емкость резистора и монтажа), тогда делитель принимает вид, показанный на рис. 40, *в*. Так выполнен, например, делитель в вольтметре типа В3-7.

Емкость проводов или прилагаемых к вольтметрам кабелей для подключения измеряемого напряжения сравнительно велика. Например, у кабеля упомянутого вольтметра В3-7 она составляет около 75 *пф*. Для уменьшения входной емкости вольтметра делитель делают выносным (внешним). На рис. 40, *г* показан внешний делитель вольтметра типа В3-3 с коэффициентом деления 1 : 100. Так как активное входное сопротивление самого вольтметра 1 *Мом* и оно подключается параллельно резистору R_2, сопротивление последнего равно 10,2, а не 10 *ком*. Входная емкость такого делителя не более 6 *пф*, в то время как у вольтметра В3-7 она около 20 *пф* и сюда еще добавляется емкость кабеля (75 *пф*). Для уменьшения емкости лампу катодного повторителя тоже помещают в выносной пробник, как это сделано у вольтметра В3-3. Входная емкость у его пробника не превышает 10 *пф*. Входная емкость вольтметра с делителем, показанным на рис. 40, *а*, зависит от положения переключателя делителя. В положении 1 : 1 входная емкость значительно больше, чем в других положениях.

В некоторых случаях нужно, чтобы входная емкость была постоянна на всех пределах измерения. Это нетрудно осуществить при нескольких делителях на входе, как это показано на рис. 40, *б*. Обычно на входе включены два делителя: R_0, обеспечивающий коэффициент деления 1 : 1, и R_1R_2, позволяющий разделить напряжение в пропорции, например, 1 : 100. Емкость конденсатора C_1 устанавливают примерно равной входной емкости $C_{вх}$ усилителя и, кроме того, параллельно резистору R_0 и делителям R_1R_2 включают подстроечные конденсаторы, которыми окончательно (после установки C_1) уравнивают входные емкости на различных пределах. При этом к вольтметру можно изготовить дополнительный делитель, заключив его верхнее плечо, состоящее из резистора и подстроечного конденсатора, в выносной пробник. Это возможно потому, что при всех положениях входного делителя вольтметра его сопротивление и емкость сделаны одинаковыми.

Настройку делителя удобно производить при помощи генератора прямоугольных импульсов и осциллографа. Импульсы подают на вход и наблюдают на экране осциллографа их форму на выходе усилителя вольтметра. Емкость конденсатора C_1 изменяют до получения наиболее прямоугольной формы. Если у импульсов завален передний фронт (рис. 40, *д*), то, значит, установленная емкость C_1 слишком мала, если же импульс имеет выброс (рис. 40, *е*), значит, емкость этого конденсатора велика. При правильно подобранной емкости C_1 импульсы остаются прямоугольными (рис. 40, *ж*).

Завершая разговор о входных делителях, укажем на следующее. При диапазоне частот, не выходящем за пределы 20—40 *кгц*, входной делитель может быть некомпенсированным. При частотах до 300—500 *кгц* входной делитель компенсируют уже рассмотренным способом. При частотах до 10 *Мгц* компенсируют делитель на выходе катодного повторителя, а входной делитель компенсируют по сложным схемам или обходятся без него. Расчет резисторов делителей производят по той же формуле, что и делителей постоянного напряжения (см. стр. 67).

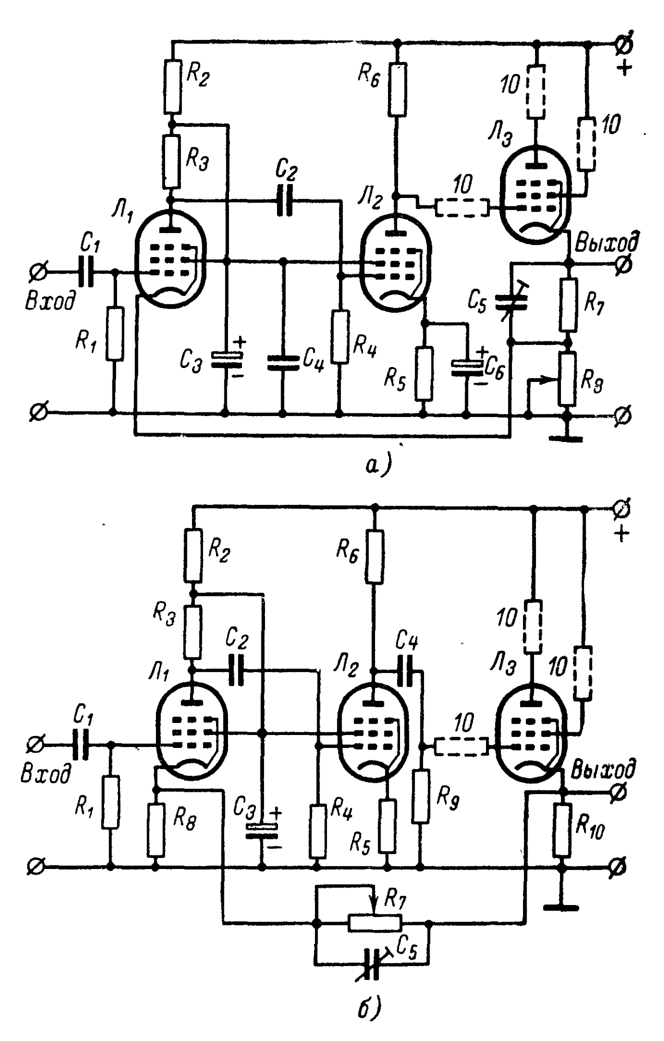


Рис. 41. Схемы трехкаскадных секций широкополосного усилителя в электронном вольтметре переменного тока.

а — с общим катодным резистором R_8; *б* — с раздельными катодными резисторами.

Усилители большинства ламповых вольтметров переменного тока представляют собой одну или несколько трехкаскадных секций с отрицательной обратной связью (рис. 41). Первые два каскада секции усилительные, а третий каскад — катодный повторитель. Коэффициент обратной связи β секции приблизительно равен R_8/R_7, приблизительно потому, что со стороны катода лампы $Л_1$ параллельно резистору R_8 включено выходное сопротивление первого каскада $R_{вых.к} = (R_i + R_а)/(1 + \mu)$, где R_i и $R_а = R_3$ — внутреннее сопротивление и сопротивление анодной нагрузки первой лампы,

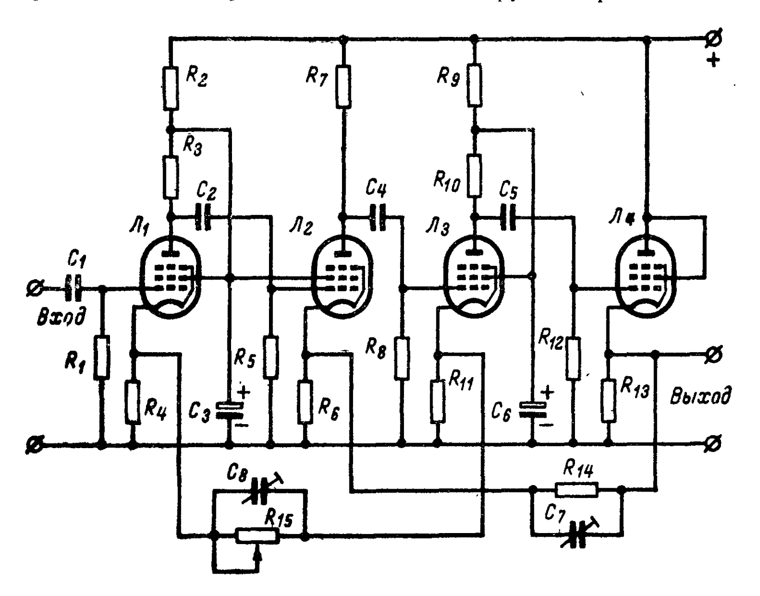


Рис. 42. Схема четырехкаскадной секции широкополосного усилителя в электронном вольтметре переменного тока.

а μ — ее статический коэффициент усиления. Для пентода $R_{вых.\,к} = \frac{1}{S} + \frac{R_а}{SR_i} \approx \frac{1}{S}$, потому что широкополосные усилители работают с малыми анодными нагрузками. Для секций безусловно выполняется условие $K_0\beta \gg 1$, поэтому их коэффициент усиления близок к значению $1/\beta \approx R_7/R_8$.

Делитель R_7R_8 в цепи обратной связи компенсируют изменением емкости конденсатора C_5. Степень компенсации регулируют так же, как и у входного делителя, наблюдая с помощью осциллографа форму прямоугольных импульсов напряжения на выходе усилителя.

Полоса пропускания секций, показанных на рис. 41, может быть от 8—15 *гц* до 6 *Мгц* (первая лампа 6Ж1П, вторая и третья 6Ж3П, анодные резисторы сопротивлением 10 *ком*, сопротивление в цепи экранирующих сеток 10 *ком*, коэффициент усиления 100, напряже-

ние питания 300 *в*). Нужно заметить, что монтаж секций должен быть продуман и выполнен короткими проводами; в цепи управляющей и экранирующей сеток лампы $Л_3$ (включенной триодом), а также в цепи ее анода нужно включить резисторы сопротивлением 10—20 *ом*, по возможности безындуктивные, препятствующие возникновению паразитной генерации на высоких частотах.

Еще более широкая полоса пропускания (до 12 *Мгц*) может быть получена в четырехкаскадной секции усилителя (рис. 42) с двумя отрицательными обратными связями (с третьей лампы на первую и с четвертой на вторую). Такую же полосу пропускания можно получить и при двух последовательно включенных трехкаскадных секциях, каждая из которых имеет широкую полосу пропускания, полученную за счет коэффициента усиления. Для этого применяют малые анодные нагрузки (порядка 2 *ком*) и большой коэффициент обратной связи (до 30%). Для расширения полосы пропускания применяют также простые схемы частотной коррекции.

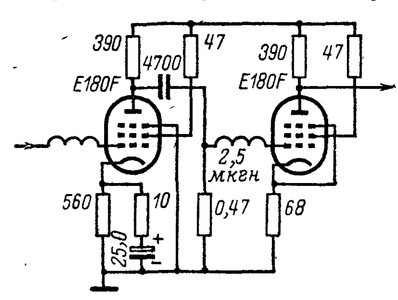


Рис. 43. Схема усилительных каскадов с частотной коррекцией в электронном вольтметре типа GM6014.

Если нужно дальнейшее расширение полосы пропускания, то от обратных связей отказываются, так как иначе практически неизбежно самовозбуждение усилителя. В этом случае применяют обычные широкополосные усилители с простой или сложной частотной коррекцией и уменьшают сопротивления анодных нагрузок до нескольких сотен ом.

По этому принципу, например, выполнены электронные вольтметры типа GM6014 фирмы Philips, рассчитанные на диапазон частот 1 *кгц* — 30 *Мгц*. Вольтметр содержит выносной пробник с катодным повторителем, делитель, шестикаскадный широкополосный усилитель с общим коэффициентом усиления около 3000 и детектор с удвоением напряжения. Усилительные каскады вольтметра в принципе однотипны (два из них показаны на рис. 43). Примененные в них лампы E180F аналогичны отечественным лампам 6Ж9П. К вольтметру прилагается внешний емкостной делитель. Без делителя пределы измерения 1, 3, 10, 30, 100 и 300 *мв*, а с делителем (частотный диапазон 10 *кгц* — 30 *Мгц* ± 5%) 0,1; 0,3; 1; 3; 10 и 30 *в*.

По тому же, примерно, принципу, выполнен и отечественный вольтметр типа В3-4. Его частотный диапазон составляет 40 *гц* — 30 *Мгц*. Усилитель содержит шесть каскадов, из которых три усилительные на лампах 6Ж9П с индуктивной коррекцией частотной характеристики, а три — разделяющие их катодные повторители на лампах 6С3П. Пределы измерения вольтметра 10, 30, 100, 300 и 1000 *мв*. С внешним делителем верхний предел измерения доходит до 100 *в*. Коэффициент усиления усилителя этого вольтметра (на пределе измерения 10 *мв*) равен 100. Внешний вид вольтметра В3-4 показан на рис. 44.

Детекторы в электронных вольтметрах переменного тока типа усилитель-детектор обычно выполняются по мостовой схеме с полупроводниковыми диодами и рассчитываются на амплитудное или среднее значения напряжения. В некоторых вольтметрах действующего значения напряжения применяют квадратичный детектор (например, в вольтметре типа В3-5).

Для улучшения линейности шкалы детектор иногда включают в цепь обратной связи. (рис. 45). При этом в вольтметрах с относительно нешироким частотным диапазоном (не выше 1 *Мгц*) выход-

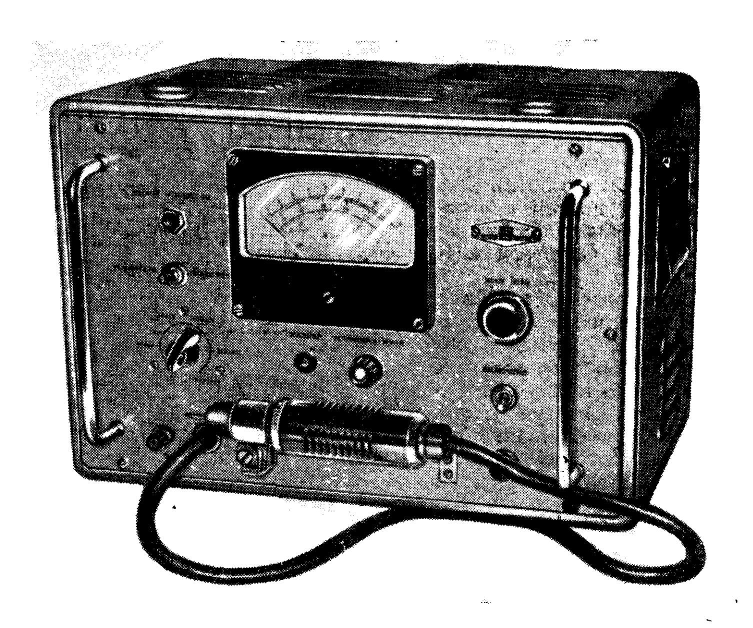


Рис. 44. Вольтметр типа В3-4.

ной катодный повторитель часто исключают, и детектор подключают к анодной нагрузке усилительного каскада.

Для примера на рис. 46 приведена схема выходной секции усилителя вольтметра типа GM6012 фирмы Philips (диапазон частот 2 *гц* — 1 *Мгц*). В этой схеме компенсация в цепи обратной связи осуществляется подстроечным конденсатором.

Большинство вольтметров снабжено источником стабильного калибровочного напряжения. Обычно это мостовой стабилизатор с нелинейным элементом, например электрической лампочкой. В одном из положений переключателя пределов измерения калибровочное напряжение поступает на вход усилителя. Значение калибровочного напряжения таково, что при номинальном коэффициенте усиления усилителя указатель индикатора устанавливается на конечную отметку шкалы. Если этого не происходит, то коэффи-

Рис. 45. Схема усилителя электронного вольтметра с мостовым детектором в цепи обратной связи.

Рис. 46. Схема выходной секции усилителя в электронном вольтметре типа GM6012.

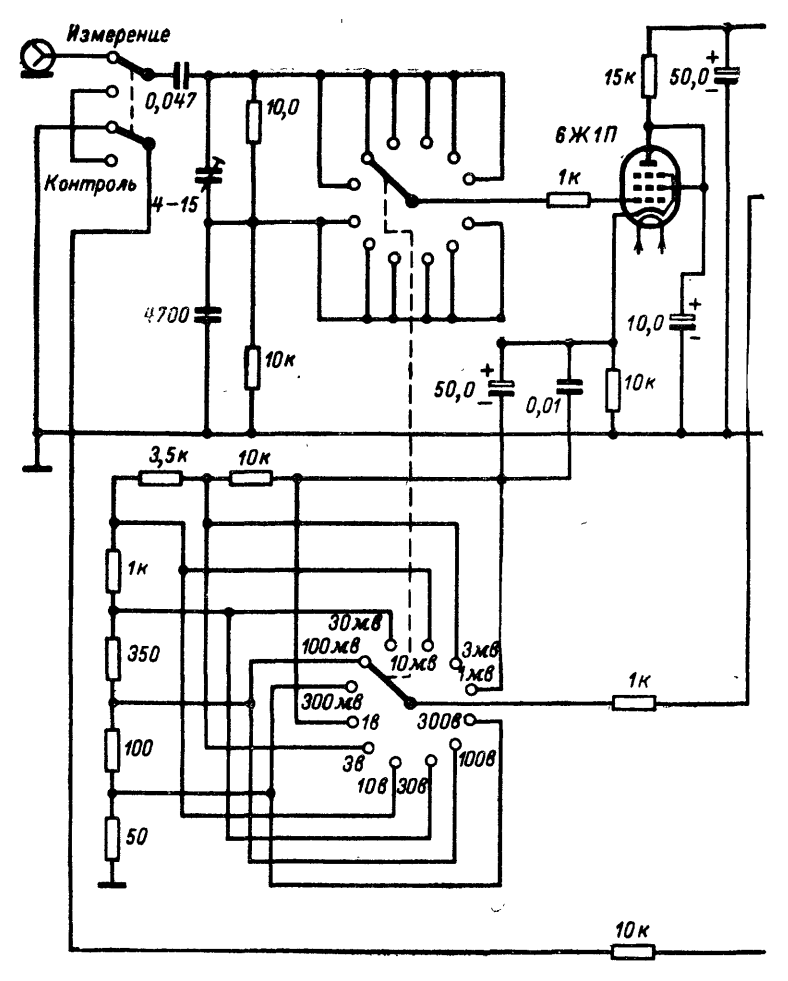
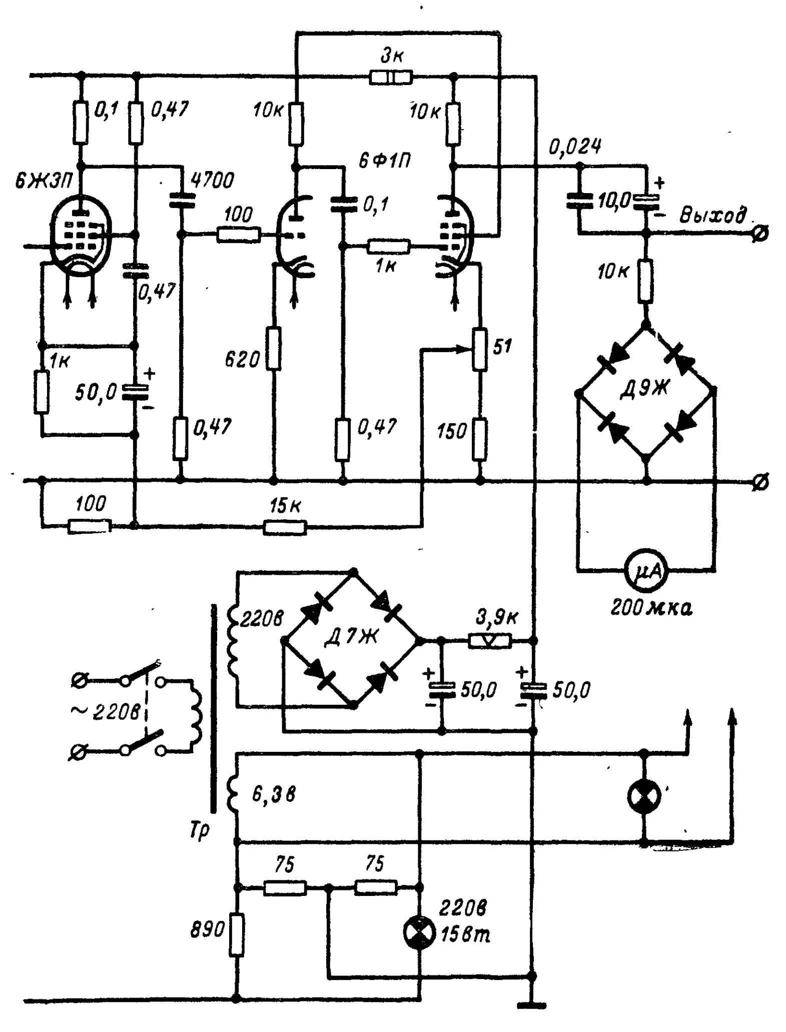


Рис. 47. Схема лампового

циент усиления возвращают к номинальному значению регулировкой глубины обратной связи. Ручку соответствующего потенциометра выводят под шлиц.

На рис. 47 показан несложный вольтметр, построенный на основе изложенных принципов. Он рассчитан на диапазон частот 18 *гц* — 250 *кгц* и это позволяет использовать его для измерений в усилителях



вольтметра переменного тока.

низкой частоты и в магнитофонах. Вольтметр имеет 12 пределов измерения (от 1 *мв* до 300 *в*). На шкале 0—1 *мв* уход стрелки прибора от нулевого положения, обусловленный шумом усилителя, составляет около 10% длины шкалы.

Вольтметры переменного тока могут быть сконструированы также и на транзисторах. На рис. 48 приведена схема транзистор-

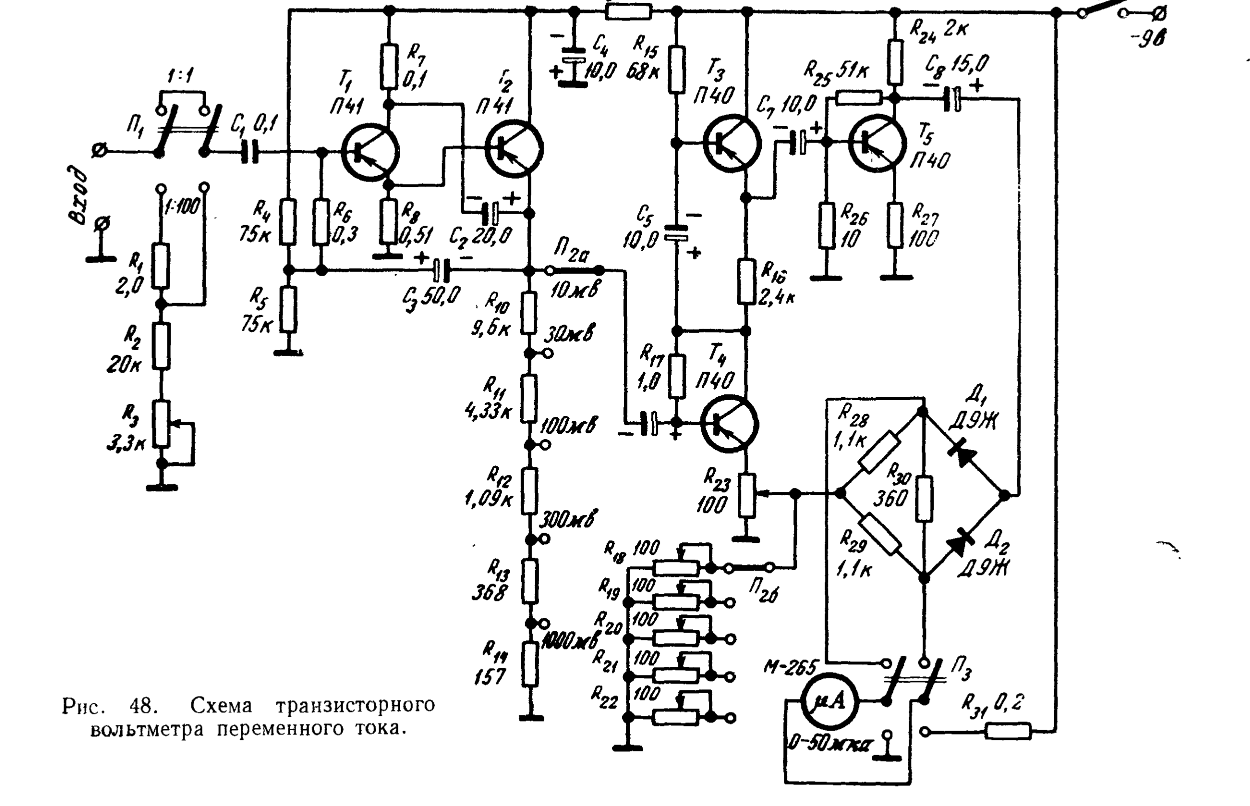


Рис. 48. Схема транзисторного вольтметра переменного тока.

ного вольтметра, повторяющая с небольшими изменениями схему В. Нуждина, опубликованную в журнале «Радио» № 3 за 1963 г. Частотный диапазон этого вольтметра 20 *гц* — 50 *кгц*.

Для контроля модулированных высокочастотных колебаний вольтметры снабжают иногда внешними пиковыми детекторами.

Вольтметры типа детектор-усилитель. Диодный пиковый детектор совместно с электронным усилителем постоянного тока образуют вольтметр типа детектор-усилитель. Однако, как правило, отдельно такие вольтметры не делают, предпочитая им комбинированные (универсальные), в которых к одному и тому же усилителю подключают входной делитель при измерении постоянного напряжения или детектор при измерении переменного.

Диодный пиковый вольтметр представляет собой обычный диодный детектор с высокоомным сопротивлением нагрузки. Последо-

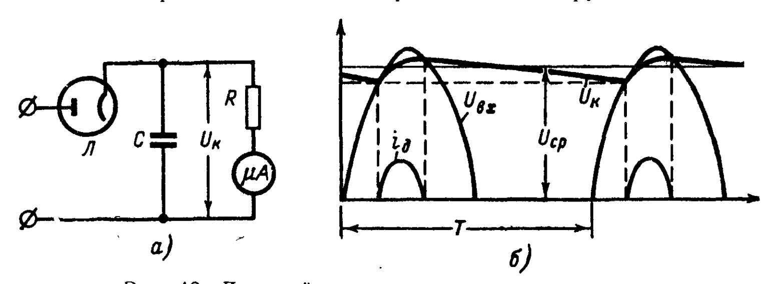


Рис. 49. Диодный вольтметр с открытым входом.

а — схема вольтметра; *б* — форма напряжения на нагрузке вольтметра.

вательно с нагрузкой включают индикаторный прибор, градуируемый обычно в действующих значениях синусоидального входного напряжения. Сравнительно с предыдущими вольтметрами они менее чувствительны, но зато они намного проще и работают до гораздо более высоких частот. Различают диодные вольтметры с открытым и закрытым входами.

В схеме с открытым входом (рис. 49, *а*) диод *Л* включен последовательно с резистором R нагрузки и непосредственно связан с испытуемой цепью. Назовем произведение емкости конденсатора C на выходное сопротивление $R_{вых}$ источника измеряемого напряжения постоянной времени зарядной цепи $\tau_{зар} = R_{вых}C$*, а произведение RC постоянной времени детектора и обозначим период измеряемого напряжения через T (во всем частотном диапазоне вольтметра постоянная времени детектора значительно больше периода измеряемого напряжения). В момент измерения при первой положительной полуволне измеряемого напряжения происходит заряд конденсатора

* Более точно постоянная времени зарядной цепи равна произведению емкости C на сопротивление, образованное параллельным соединением выходного сопротивления источника $R_{вых}$ и суммы сопротивления R и прямого сопротивления диода $R_д$, т. е. $\tau_{зар} = \frac{R_{вых}(R + R_д)}{R_{вых} + R + R_д} C$. Но $R_д \ll R$, а с другой стороны, во избежание ошибок всегда соблюдают условие $R \gg R_{вых}$. Поэтому можно считать, что $\tau_{зар} \approx R_{вых} C$.

C через диод. Если $\tau_{зар} \ll T$, то уже первой полуволной конденсатор будет заряжен до амплитудного значения напряжения U_m. Если же постоянная времени цепи заряда сравнима с длительностью периода измеряемого напряжения, то конденсатор успеет зарядиться только до некоторого уровня $U_к$, меньшего чем U_m (рис. 49, *б*).

Когда входное напряжение $U_{вх}$ станет меньше $U_к$, диод запрется и конденсатор C начнет разряжаться через резистор R с постоянной времени RC. Разряд продолжается до тех пор, пока при следующей положительной полуволне входное напряжение и напряжение на конденсаторе сравняются. В этот момент диод отпирается, и при дальнейшем повышении входного напряжения конденсатор заряжается до более высокого напряжения, чем при первой положительной полуволне, потому что некоторый заряд на нем уже есть. Спустя несколько периодов измеряемого напряжения конденсатор будет заряжаться каждый раз почти до амплитудного значения напряжения.

Ток через диод $i_д$ протекает только в те малые промежутки времени, когда входное напряжение превышает напряжение на конденсаторе. Этот ток восполняет потерю заряда конденсатором за время, в течение которого диод заперт. Среднее значение напряжения на резисторе R при установившемся процессе близко к амплитудному значению измеряемого напряжения.

Это верно для высоких и средних частот, когда разряд конденсатора C через резистор R за период измеряемого напряжения ничтожно мал. На низких частотах в промежуток времени между импульсами тока через диод конденсатор успевает заметно разряжаться. Среднее значение напряжения $U_{ср}$ на нагрузке детектора становится меньше амплитудного значения U_m измеряемого напряжения. Эта разница есть не что иное, как абсолютное значение частотной погрешности показаний вольтметра на низких частотах.

Найдем приближенно зависимость частотной погрешности от постоянной времени детектора RC, что позволит нам рассчитать нижнюю границу частотного диапазона вольтметра. В установившемся режиме конденсатор заряжается, как мы говорили, примерно до амплитудного значения измеряемого напряжения U_m. После отсечки диода разряд конденсатора происходит по экспоненциальному закону с постоянной времени RC

$$u = U_m e^{-\frac{t}{RC}},$$

где u — мгновенное значение напряжения на конденсаторе в момент времени t.

За начало отсчета принят момент запирания диода, потому что в установившемся режиме достаточно определить среднее за один период. Если бы за начало отсчета времени был принят момент подключения вольтметра, то в предыдущей формуле координату t пришлось бы заменить на $t - \tau$, где τ—момент запирания диода в интересующем нас периоде, отсчитанный от момента подключения вольтметра.

Разряд конденсатора относительно невелик и поэтому происходит на начальном участке экспоненты, т. е. приблизительно линейно

$$u = U_m\left(1 - \frac{t}{RC}\right).$$

Длительность разряда можно без большой погрешности принять равной периоду измеряемого напряжения $T = 1/f$. Следовательно, к концу периода конденсатор разрядится на U_m/fRC. Чтобы найти среднее за период значение напряжения $U_{ср}$ на нагрузке детектора, нужно из напряжения U_m вычесть половину напряжения, на которое разряжается конденсатор за период

$$U_{ср} = U_m\left(1 - \frac{1}{2fRC}\right).$$

Относительная частотная погрешность

$$\delta_f = \frac{U_{ср} - U_m}{U_m} = -\frac{1}{2fRC}.$$

Знак минус означает, что показания вольтметра меньше действительного значения напряжения.

Задавшись погрешностью на нижней граничной частоте частотного диапазона проектируемого вольтметра, находят необходимую постоянную времени. Если, например, $\delta_f = 0{,}01$ и $f = 20$ *гц*, то $RC = 0{,}4$ *сек*. Сопротивление R определяется пределом измерения и током полного отклонения индикаторного прибора. Если предел 1 *в*, а индикаторным прибором является микроамперметр на 50 *мка*, то $R = 1/50 \cdot 10^{-6} = 20$ *ком* и $C = 0{,}4/2 \cdot 10^4 = 20$ *мф*.

Но такая большая входная емкость вольтметра ограничивает его частотный диапазон со стороны верхних частот. Активная составляющая входной проводимости вольтметра из-за большого собственного потребления индикаторного прибора будет в рассматриваемом случае, очевидно, также невелика.

Поэтому, выбрав RC по заданной погрешности на нижней частоте, нужно для расширения частотного диапазона позаботиться о том, чтобы отношение R/C было возможно бо́льшим. Для этого прибегают к помощи электронных усилителей (напряжение на емкости C измеряют большей частью ламповым вольтметром постоянного тока). Резистор R представляет собой при этом сопротивление утечки входной лампы усилителя. Его обычная величина, как уже говорилось, равна 10 *Мом*. При указанной постоянной времени детектора $RC = 0{,}4$ *сек* потребуется емкость всего 0,04 *мф*. Тем не менее и такая емкость слишком велика при измерении на высоких частотах. Поэтому, как правило, всю полосу частот от 20 *гц* до 100—150 *Мгц*, в которой работают радиоустройства с сосредоточенными постоянными, разделяют на два диапазона, перекрываемых диодными вольтметрами с различными значениями емкости конденсатора C. Вольтметры звукового диапазона имеют зарядную емкость 0,05—0,015 *мф*, а вольтметры высоких частот 30—100 *пф*.

Кроме входной емкости, частотный диапазон диодного вольтметра ограничивает еще инерция электронов, т. е. конечное время пролета электронами промежутка катод—анод диода. Помимо этого, на высоких частотах оказывают влияние индуктивность вводов и емкость между ними. Если замкнуть накоротко входные зажимы детектора, то эти индуктивности образуют колебательный контур, определяющий так называемую собственную частоту входной цепи. Она различна для разных ламп и конструкций и лежит в области 300—1000 *Мгц*.

Детекторы с открытым входом в настоящее время применяются сравнительно редко. С их помощью нельзя измерять переменное напряжение с постоянной составляющей, и, кроме того, при вакуумном диоде начальный ток его протекает через внешнюю цепь, что является причиной погрешности. Достоинство же схемы с открытым входом заключается в ее относительно большом входном сопротивлении.

О входном сопротивлении такой нелинейной цепи, как диодный вольтметр, можно говорить только с энергетической точки зрения, потому что через резистор ток протекает лишь часть периода и имеет несинусоидальную форму. По этой причине мгновенное входное сопротивление непрерывно меняется. Считают, что вольтметр имеет постоянное входное эквивалентное сопротивление $R_{\text{вх. э}}$, которое находят из того условия, что это сопротивление потребляет при одинаковом входном напряжении ту же мощность, что и вольтметр. При синусоидальном напряжении на сопротивлении $R_{\text{вх. э}}$ рассеивается мощность $U^2/R_{\text{вх. э}}$, где U — действующее значение напряжения. Так как напряжение на нагрузке вольтметра близко к пиковому (амплитудному) значению, то вольтметр потребляет мощность $(\sqrt{2}U)^2/R$, где R — сопротивление нагрузки вольтметра. Приравнивая эти выражения, получим $R_{\text{вх. э}} = R/2$.

В вольтметрах с закрытым входом (рис. 50, *а*) используют параллельную схему детектора, в которой диод включен параллельно резистору нагрузки R. Так как диод отделен от испытуемой цепи конденсатором C, его катод находится под нулевым потенциалом, а начальный ток диода протекает только по внутренней цепи детектора. Через резистор R проходит не только постоянная, но и переменная составляющая тока, в связи с чем потребляемая вольтметром мощность больше, чем у вольтметра с открытым входом.

При положительном полупериоде напряжения конденсатор C заряжается через диод *Л* приблизительно до амплитудного значения входного напряжения (рис. 50, *б*), а при отрицательном диод заперт и к резистору R приложено напряжение, равное сумме измеряемого напряжения и напряжения на конденсаторе. Так как постоянная времени RC велика по сравнению с периодом измеряемого напряжения, конденсатор не успевает заметно разрядиться за период и напряжение на нем все время примерно равно амплитудному значению измеряемого напряжения.

Напряжение на нагрузке повторяет входное напряжение, но оно поднято на величину его амплитудного значения. Когда через диод проходит импульс тока, восполняющий потерю заряда конденсатором, напряжение на нагрузке равно нулю (точнее, если учитывать сопротивление диода, оно имеет положительный потенциал в несколько десятых долей вольта), когда же отрицательная полуволна достигает максимума, это напряжение максимально и примерно равно удвоенной амплитуде измеряемого напряжения (его полярность отрицательна), затем оно вновь уменьшается до нуля.

На низких частотах, когда конденсатор успевает заметно разряжаться, напряжение на резисторе R уменьшается, а форма переменной его составляющей отличается от формы входного напряжения потому, что диод отпирается на более длительное время. Среднее значение напряжения на резисторе R, приблизительно равное амплитудному значению измеряемого напряжения, регистрируется индикаторным прибором, включенным в цепь резистора либо непо-

средственно, либо через усилитель. Переменная составляющая напряжения на резисторе R могла бы перегрузить усилитель (или индикаторный прибор). Во избежание этого в схему детектора вводят фильтр нижних частот $R_ф C_ф$ (рис. 50, *в*).

Поскольку вольтметр с закрытым входом потребляет большую мощность, эквивалентное входное сопротивление его меньше, чем у вольтметра с открытым входом. На средних частотах мощность, потребляемая вольтметром, складывается из составляющей U_m^2/R,

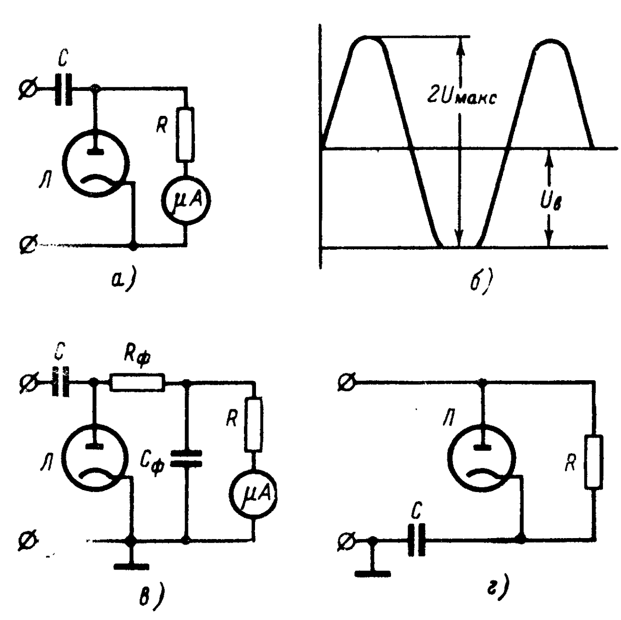


Рис. 50. Диодный вольтметр с закрытым входом.

а — схема вольтметра; *б* — форма напряжения на нагрузке вольтметра; *в* — схема с фильтром нижних частот; *г* — схема с конденсатором в заземляемой шине.

обусловленной протеканием среднего тока U_m/R, и составляющей $U_m^2/2R$ от переменного тока. Суммарная мощность равна $3U_m^2/2R$. Приравнивая ее мощности $U_m^2/2R_э$, которая выделялась бы на эквивалентном резисторе при том же входном напряжении, получим $R_э = R/3$. В схеме с фильтром нужно учитывать еще и мощность, рассеиваемую на резисторе фильтра $R_ф$. Так как к этому резистору приложено почти все переменное напряжение (оно, напоминаем, равно входному), дополнительный расход энергии составляет $U_m^2/2R_ф$ и эквивалентное входное сопротивление в этом случае $R_э = R\Big/\left(3 + \frac{R}{R_ф}\right)$.

Входная емкость вольтметра, образуемая емкостью вводов и монтажа, а также эквивалентной емкостью самого детектора, может повлиять на режим испытуемой цепи. Поэтому при измерениях стремятся обходиться без соединительных проводов и подносить детектор как можно ближе к источнику измеряемого напряжения. Используемые в вольтметрах звукового диапазона конденсаторы имеют большую емкость на корпус. Чтобы устранить ее влияние, конденсатор иногда включают в ту цепь детектора, которая идет к нулевой (заземляемой) шине (рис. 50, *г*). Накальную цепь диода в этом случае заземлять нельзя.

В диодных вольтметрах находят применение как электровакуумные, так и полупроводниковые диоды. В промышленных вольтметрах предпочтение пока отдается электровакуумным приборам. Они

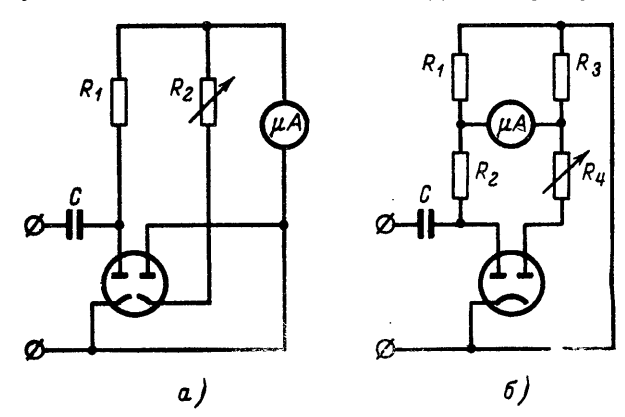


Рис. 51. Компенсация начального тока вакуумного диода в диодных вольтметрах.

а — при двойном диоде с раздельными катодами; *б* — при двойном диоде с общим катодом.

не имеют обратного тока, характеристика их не зависит от температуры и мало меняется со временем. Недостатки же электровакуумных диодов заключаются в основном в необходимости расходовать мощность на накал и в протекании через диод при нулевой разности потенциалов на его электродах тока, обусловленного тем, что электроны вылетают с накаленного катода не с нулевыми, а с некоторыми начальными скоростями (начальный ток). Влияние начального тока компенсируют при помощи второго диода, как это показано на рис. 51.

Полупроводниковые диоды имеют меньшую емкость, нежели электровакуумные. Они малы по размерам и не требуют питания. Однако относительно невысокое обратное сопротивление и его зависимость от температуры ограничивают их применение. Кремниевые диоды в этом отношении лучше германиевых, но у них более нелинеен начальный участок характеристики, в связи с чем они непригодны для вольтметров с чувствительными шкалами. Вместе с тем предельные обратные напряжения высокочастотных точечных

диодов невелики. Последовательное включение нескольких диодов для расширения пределов измерения малоэффективно из-за большого разброса их обратных сопротивлений, применение же выравнивающих резисторов здесь недопустимо. Кроме того, при этом увеличиваются падение напряжения на диодах и паразитная емкость, а это увеличивает погрешности и сужает диапазон частот вольтметра. При бросках же тока в момент начального заряда конденсатора полупроводниковые диоды могут быть повреждены. Поэтому при проектировании вольтметра, прежде чем отдать предпочтение тому или иному виду диода, все эти достоинства и недостатки электровакуумных и полупроводниковых диодов должны быть приняты во внимание.

Подведем краткий итог. Диодные вольтметры измеряют пиковое (амплитудное) значение напряжения. Они повсеместно распространены благодаря простоте и широкому частотному диапазону, причем преимущественно применяют диодные вольтметры с закрытым входом. Индикаторный прибор может быть включен последовательно с резистором R. В целом они составляют вольтметр, при помощи которого измеряют среднее напряжение на емкости конденсатора C. Малая чувствительность индикаторных приборов не позволяет применять резисторы большого сопротивления, что в конечном итоге ограничивает частотный диапазон вольтметра со стороны высоких частот. Поэтому напряжение на конденсаторе измеряют, как правило, электронным вольтметром постоянного тока, который при этом становится комбинированным. В электронном вольтметре предусматривают в связи с этим дополнительные цепи с соответствующей коммутацией. Некоторые дальнейшие сведения о диодных пиковых детекторах мы изложим применительно к комбинированным электронным вольтметрам.

19. Комбинированные электронные вольтметры

В простейшем случае комбинированные (универсальные) вольтметры строят по схеме, показанной на рис. 52, причем усилитель постоянного тока (обычно ламповый) для такого вольтметра выполняют по примерно такой же схеме, как на рис. 35. При верхнем (по схеме) положении переключателя $П_1$ измеряют постоянное, а при нижнем — переменное напряжение.

Резистор R_1 играет здесь роль сглаживающего сопротивления фильтра. Вместе с тем он представляет собой сопротивление, на котором падает часть напряжения, соответствующая переходу от амплитудного значения напряжения к действующему. При идеальном выпрямлении сопротивление этого резистора должно составлять 0,41 от сопротивления делителя R_{3-5} (например, при $R_{3-5} = 11$ *Мом*, $R_1 = 4{,}51$ *Мом*). В этом случае для выбора пределов измерения было бы достаточно одного переключателя. Практически же при переключении предела измерения приходится изменять и сопротивление резистора R_1 (от 4,5 *Мом* на шкале 0—1,5 *в* до 6,1 *Мом* на шкалах 0—50 *в* и выше). Если усилитель вольтметра линеен в широком диапазоне изменения входных напряжений (а это обычно так и есть), то устанавливают только один резистор R_1 сопротивлением примерно 0,4 от сопротивления делителя (или сопротивления утечки сетки, если делителя нет). Пределы же измерения переменного на-

пряжения меняют тем же способом, что и постоянного (переключением добавочных резисторов к индикаторному прибору).

Способы компенсации влияния начального тока электровакуумных диодов в комбинированных вольтметрах показаны на рис. 53. Первый из них заключается в том, что к сетке правого (по схеме) триода лампы $Л_2$ усилителя подключают цепь, примерно такую же, как и на входе (рис. 53, *а*). Падение напряжения на резисторах R_5 и R_6, создаваемое начальным током вспомогательного диода $Л_3$, устанавливают при помощи резистора R_7 таким же, как и то, которое создается током диода $Л_1$ на резисторах R_2 и R_3 входного делителя. Такая компенсация применяется только на низших пределах измерения (одном-двух), на которых в сеточную цепь входной лампы включены большие сопротивления.

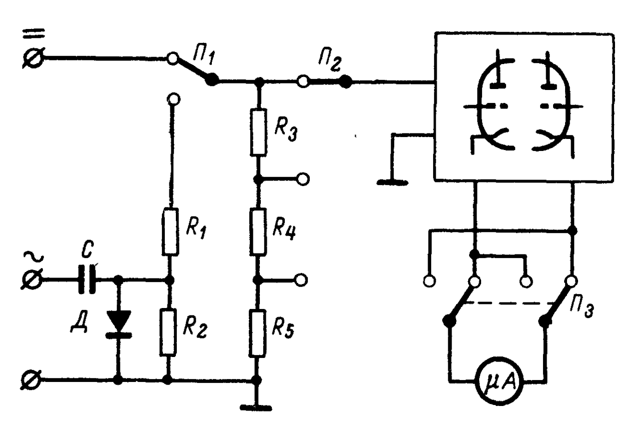


Рис. 52. Функциональная схема простейшего электронного комбинированного вольтметра.

При другом способе компенсации (рис. 53, *б*) начальные токи диодов лампы *Л* суммируются на входе усилителя. Так как полярности включения диодов противоположны, их начальные токи в сумме дают нуль.

В схеме на рис. 53, *в* для устранения начального тока на анод *Л* подан небольшой отрицательный потенциал с движка потенциометра R_3, который включен на выход выпрямителя, питаемого от накальной обмотки трансформатора. В некоторых вольтметрах накал диода питается выпрямленным и стабилизированным напряжением. Тогда потенциометр R_3 включают на выходе стабилизатора.

Чтобы перекрыть широкий частотный диапазон, к схеме детектора подключают тот или иной конденсатор или же применяют два детектора (отдельно для низких и высоких частот), различающихся по постоянной времени и по типу диода. Переключение конденсаторов часто осуществляется при помощи механических контактов, подключающих конденсатор большой емкости, когда выносной пробник с диодом (детектор) помещают в специальное гнездо в корпусе вольтметра (рис. 54, *а*). В этом случае на панель вольт-

метра выносится отдельный зажим для измерения переменных напряжений низкой частоты.

Высокочастотные диоды (такие, например, как 6Д6А, 6Д13Д и др.) рассчитаны на максимально допустимое обратное напряжение до 450 *в*. Это значит, что с ними верхний предел измерения действующего значения переменного напряжения не может превышать

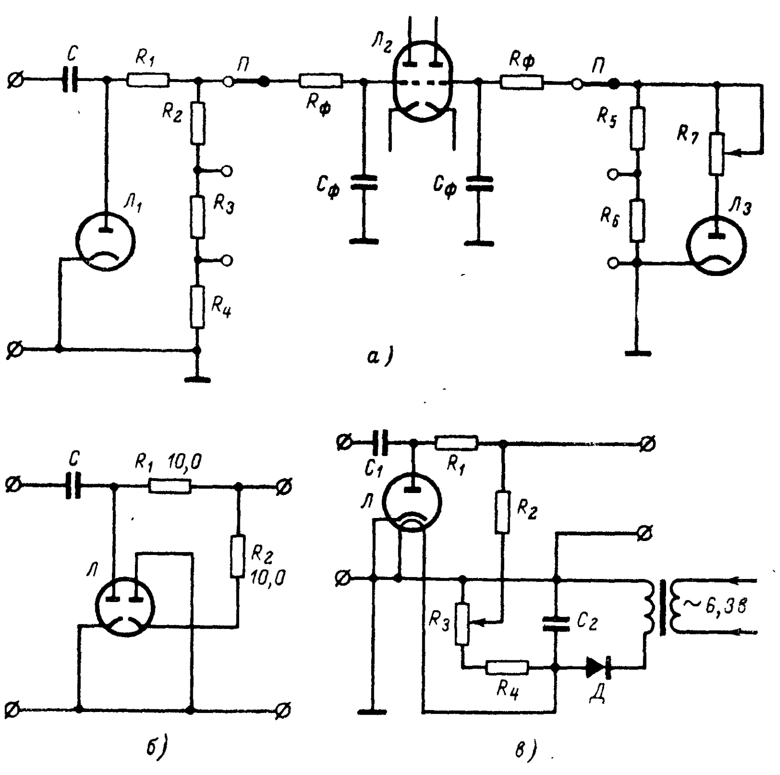


Рис. 53. Способы компенсации начального тока электровакуумных диодов в комбинированных электронных вольтметрах.

а — при помощи вспомогательного диода $Л_3$; *б* — путем суммирования токов основного и вспомогательного диодов; *в* — подачей отрицательного смещения на анод диода.

150 *в*. Для высокочастотных сигналов этого, как правило, достаточно. Для сигналов же низких частот (особенно для частот 50 *гц*) верхний предел измерения желательно довести до 1000 *в*. Для этого можно либо использовать в низкочастотном детекторе высоковольтный кенотрон с максимально допустимым обратным напряжением не менее 3 *кв*, либо, как это сделано, например, в вольтметре типа ВК7-9, ввести в схему делитель (рис. 54, *б*). Пределы измерения

в этом вольтметре изменяют переключением резисторов в выходной цепи усилителя (так же, как и при измерении постоянного напряжения).

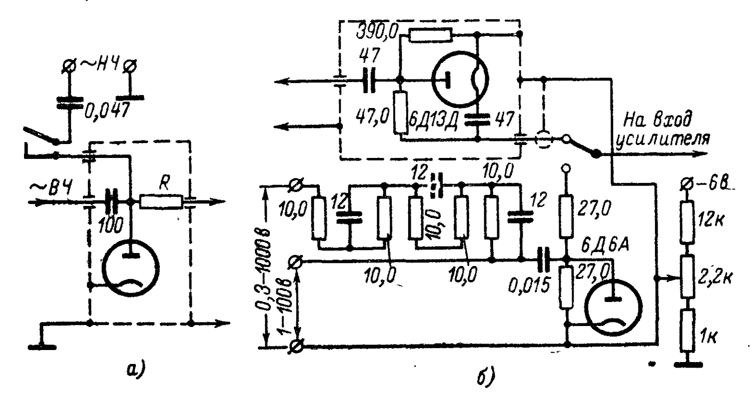


Рис. 54. Расширение частотного диапазона диодных вольтметров.

а — переключением конденсаторов; *б* — переключением диодных цепей (показана диодная часть вольтметра ВК7-9).

Высокочастотный детектор размещают обязательно в выносном пробнике и при измерениях подключают этот пробник к испытуемой цепи непосредственно (без каких-либо соединительных проводов). Конструкция пробника и монтаж в нем детектора должны быть рациональны с точки зрения получения минимальной входной ем-

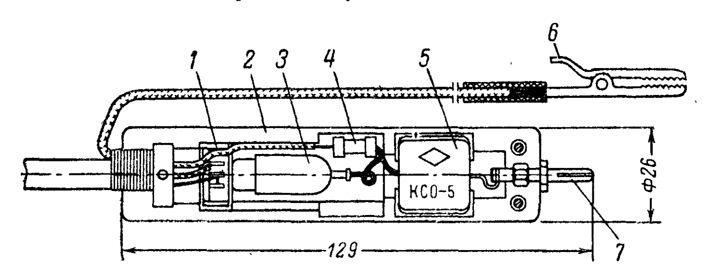


Рис. 55. Устройство высокочастотного пробника вольтметра ВК7-3.

1 — ламповая панель; *2* — корпус; *3* — диод типа 4Д5С; *4* — резистор; *5* — конденсатор; *6* — заземляющий вывод; *7* — щуп-удлинитель.

кости. Для примера на рис. 55 показана в разрезе головка высокочастотного пробника вольтметра типа ВК7-3 (А4-М2).

В комбинированных вольтметрах предусматривают обычно возможность измерения не только напряжений. Для измерения сопротивлений постоянному току, например, схема вольтметра дополняется цепью омметра, а для измерения токов индикаторный прибор вольтметра снабжают набором шунтов. Для всех дополни-

тельных цепей предусматривают, конечно, и соответствующую коммутацию.

Из промышленных универсальных вольтметров следует указать в первую очередь на вольтметр типа ВК7-9 (рис. 56), о котором мы неоднократно упоминали. Его технические данные (характерные и для других универсальных вольтметров) таковы. Пределы измерения постоянных напряжений: 0,3, 1, 3, 10, 30, 100, 300 и 1000 *в*. Пределы измерения переменных напряжений (в частотном диапазоне 20 *гц* — 700 *Мгц*): 1,3, 10, 30, 100, 300 и 1000 *в*. Пределы измерения

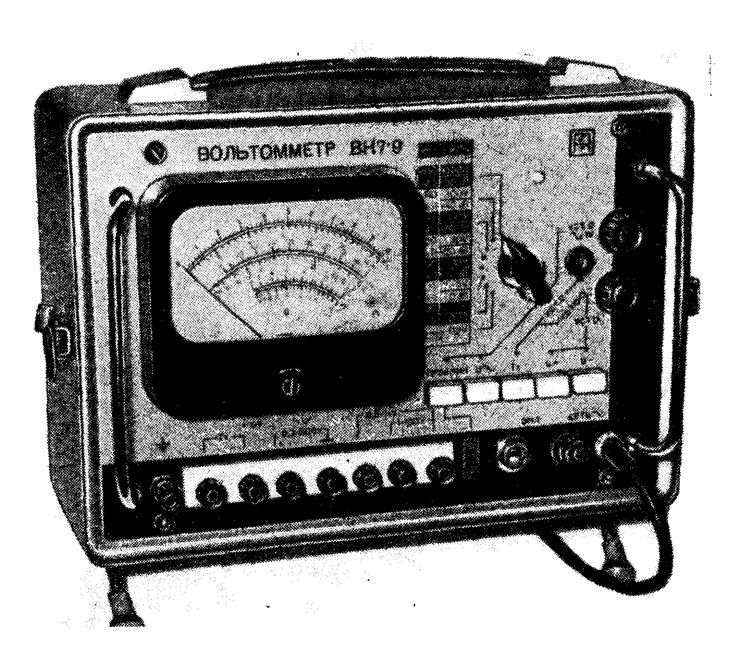


Рис. 56. Вольтомметр ВК7-9.

сопротивлений от 10 *ом* до 1 *Гом*. Входное сопротивление не менее 15 *Мом* при измерении напряжений постоянного тока и 3 *Мом* при измерении напряжений переменного тока (на частоте 1000 *гц*). Входная емкость не превышает 20 *пф* при измерении низкочастотным входом и 1,8 *пф* при измерении высокочастотным пробником. Размеры вольтметра 313×226×135 *мм*.

Широко распространен также вольтметр типа ВК7-3 (А4-М2) (рис. 57). Он имеет однокаскадный балансный усилитель (см. рис. 35) на лампе 6Н1П. В высокочастотном пробнике применен вакуумный диод типа 4Д5С. Вольтметр позволяет измерять напряжения постоянного тока в пределах 0,1—1000 *в*, переменных напряжений промышленной частоты (50 *гц*) в тех же пределах, переменных напряжений в диапазоне частот до 60 *Мгц* в пределах 0,1—150 *в* со-

противлений от 1 *ом* до 100 *Мом*, индуктивностей от 0,1 до 10^5 *гн*, емкостей от 100 *пф* до 100 *мф*.

Диодные детекторы просты и работают в широком частотном диапазоне, но с их помощью можно измерять переменные напряжения, начиная лишь с 0,1 *в*. К тому же с ними первая шкала (обычно 0—1 *в*) получается нелинейной. Поэтому для улучшения метрологических характеристик прибора электронный вольтметр постоянного тока иногда комбинируют не с диодным детектором, а с вольтметром типа усилитель-детектор.

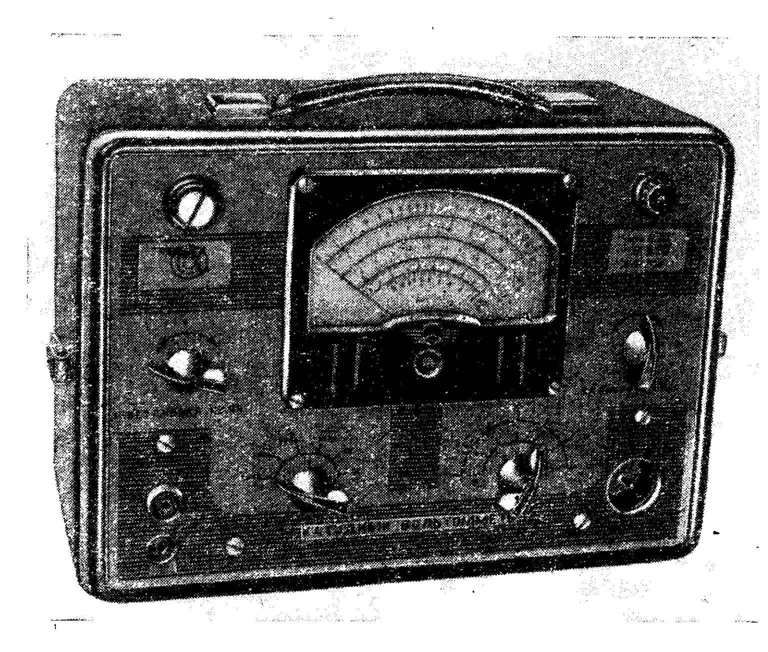


Рис. 57. Вольтметр ВК7-3.

О тренировке ламп для вольтметра. Мы указывали, что сопротивление делителя, а тем самым и сопротивление вольтметра, ограничено величиной 10—12 *Мом* из-за явлений, связанных с протеканием через делитель сеточного тока лампы. При тех режимах ламп, которые наблюдаются у них в вольтметрах, преобладает ионная составляющая тока сетки, обусловленная ионизацией молекул остатков газа в баллоне током анода. Положительные ионы движутся к управляющей сетке, которая, в отличие от других электродов лампы, имеет отрицательный потенциал. Ток ионов создает на входном делителе некоторое падение напряжения, повышающее потенциал сетки. Чем больше сопротивление делителя, тем больше падение напряжения. Это легко видеть на вольтметре, если включить его на низший предел измерения постоянного напряжения и,

заметив положение стрелки индикаторного прибора, замкнуть накоротко входные зажимы вольтметра. Стрелка при этом уйдет влево на несколько делений.

При градуировке вольтметра его вход подключают к низкоомному источнику напряжения, и действие тока сетки не учитывается. Следствием этого является ошибка измерения на низшем пределе, причем она зависит от выходного сопротивления цепи, на которой измеряется напряжение.

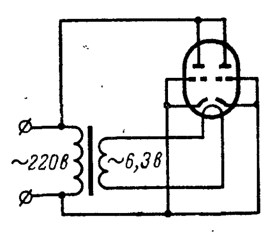


Рис. 58. Схема включения лампы для тренировки.

У разных ламп одного и того же типа содержание остаточных газов может различаться в десятки раз. Поэтому для вольтметров с повышенным входным сопротивлением можно подобрать «удачную» лампу, с которой при замыкании накоротко входных зажимов вольтметра положение стрелки индикаторного прибора не изменяется вовсе или изменяется незначительно.

Почти у каждой лампы содержание газа можно резко уменьшить следующим простым способом. Лампу подключают к какому-нибудь накальному трансформатору по схеме, показанной на рис. 58, и выдерживают ее под напряжением не менее 8 *ч*. После снятия напряжения лампа остывает, и ионы газа поглощаются геттером (на это нужно 30—60 *мин*). Затем лампу ставят в вольтметр и проверяют ее. Такая тренировка не только уменьшает содержание газа в лампе, но и стабилизирует эмиссию ее катода.

Рис. 59. Схема защиты индикаторного прибора от перегрузок.

В вольтметрах, не имеющих входного делителя, для проверки лампы к входным зажимам вольтметра подключают внешний резистор сопротивлением 10—20 *Мом*.

Защита индикаторного прибора от перегрузок. При работе с ламповым вольтметром не исключена возможность ошибочной подачи на его вход высокого напряжения, в то время как вольтметр включен на один из низших пределов измерения. Это может привести к порче индикаторного прибора вследствие его перегрузки. Для защиты прибора используют полупроводниковые диоды. Потеря точности вольтметра, связанная с диодной цепью защиты, незначительна.

На рис. 59 показана схема защиты прибора с помощью германиевого диода $Д_1$ (типов Д2, Д9), включенного в прямом направлении. Обозначим номинальный ток индикатора через $I_и$. Тогда ток через диод при отклонении стрелки на всю шкалу

$$I_д = 0{,}01\,\delta_з\,I_и,$$

где $\delta_з$ — относительное значение наибольшей погрешности в процентах, которую мы допускаем при подключении цепи защиты,

например 1%. Из-за нелинейности характеристики диода эта погрешность с уменьшением тока через прибор быстро падает.

Пользуясь характеристикой диода, находим то напряжение на диоде $U_д$, которое соответствует найденному току $I_д$. Тогда сопротивление резистора

$$R = \frac{U_д}{I_и} - R_и,$$

где $R_и$ — сопротивление индикатора.

Если для R получается отрицательное значение, то нужно или включить несколько германиевых диодов последовательно, или применить кремниевый диод.

Пусть индикаторным прибором служит микроамперметр типа М93 с пределом измерения 500 *мка* и сопротивлением 30 *ом*. Примем наибольшую погрешность от включения цепи защиты в 1%. Тогда $I_д = 5$ *мка*. Для точечного германиевого диода этот ток соответствует напряжению примерно 50 *мв*. Отсюда $R = 70$ *ом*. Какова же будет эффективность защиты? Грубо можно считать, что у точечных германиевых диодов изменение тока на порядок (в 10 раз) соответствует изменению напряжения на диоде в 0,1 *в*. Принимая стократную перегрузку, получаем, что напряжение на диоде увеличится на 0,2 *в* и составит 0,25 *в*. Ток через индикаторный прибор возрастет при этом всего в 5 раз. Конечно, из-за разброса характеристик диодов приведенные расчеты являются весьма приближенными, поэтому схемы защиты после монтажа требуют регулировки.

При необходимости двусторонней защиты включают два диода параллельно, но в разной полярности (диоды $Д_1$ и $Д_2$ на рис. 59).

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ИЗМЕРЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

20. Омметры

Омметры служат для измерения сопротивлений методом непосредственной оценки. Они бывают электромеханическими или электронными и изготовляются либо в виде отдельных приборов, либо входят составной частью в комбинированные измерительные приборы. Построение цепей омметров в электромеханических комбинированных приборах видно из схем, которые были приведены на рис. 22 и 25. Здесь мы рассмотрим электронные омметры.

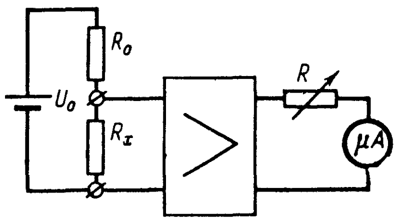


Рис. 60. Последовательная схема омметра с прямой шкалой.

На рис. 60 показана последовательная схема омметра с прямой шкалой. Измеряемый R_x и образцовый R_0 резисторы образуют делитель, питаемый от источника образцового напряжения U_0. Падение напряжения на сопротивлении R_x, измеряемое электронным вольтметром,

$$U = \frac{U_0}{1 + \frac{R_0}{R_x}}.$$

При сопротивлении $R_x = 0$ напряжение $U = 0$, и с увеличением R_x падение напряжения на нем растет. У омметров с бесконечными пределами измерения напряжение U_0 выбирают равным пределу измерения вольтметра $U_п$, так что при $R_x = \infty$ напряжение $U = U_п$. Шкала омметра с бесконечными пределами нелинейна (рис. 61). Отклонение указателя прибора ровно на половину шкалы наблюдается, очевидно, при равенстве сопротивлений измеряемого и образцового резисторов, т. е. при $R_x = R_0$. Рабочая часть шкалы охватывает около двух порядков изменения R_x (от нуля до 10 R_0), причем шкала растянута в начале и сжата в конце.

Изменение пределов измерения производится переключением образцовых резисторов. Если взять для первой шкалы резистор

$R_0 = 100$ *ом*, то получим пределы от 0 до 1000 *ом*, причем средняя точка шкалы будет соответствовать $R_x = 100$ *ом*. Для второй шкалы образцовый резистор можно взять или в 10, или в 100 раз большего сопротивления. В первом случае получим возможность отсчета всегда в первой, растянутой части шкалы (что благоприятно в смысле точности отсчета), а во втором получится меньшее число шкал. Перед началом измерений проверяют выполнение условия $U_0 = U_п$ при разомкнутых зажимах для подключения R_x и, в случае необходимости, указатель индикатора устанавливают на конечную отметку шкалы резистором переменного сопротивления R.

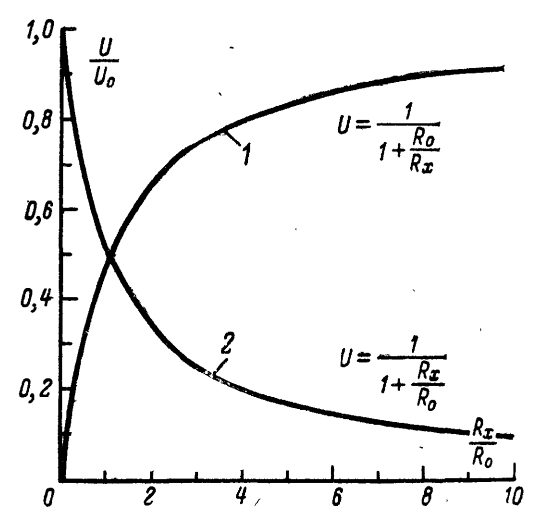


Рис. 61. Прямая (*1*) и обратная (*2*) шкалы омметров.

Для питания измерительной цепи можно применить гальванический сухой элемент, стабилизированный выпрямитель или другой какой-либо стабильный источник. В универсальном вольтметре ВК7-4, например, напряжение питания снимается с десятиомного резистора делителя, подключенного параллельно стабилитрону СГ3С. В вольтметре ВК7-9 источником питания служит транзисторный стабилизатор напряжения накала первой лампы. В принципе можно обойтись и без специального источника питания, так как в электронном вольтметре всегда можно найти точку, потенциал которой достаточно постоянен. В схеме на рис. 36, например, такой точкой может быть катод первой лампы усилителя, а в одноламповом усилителе (рис. 35) можно включить общий катодный резистор нужного сопротивления и снимать с него напряжение для питания цепи омметра. Сопротивление источника питания должно составлять не более сотой доли сопротивления образцового резистора. Это ограничивает пределы измерения снизу, т. е. со стороны малых сопротивлений. С другой стороны, входное сопротивление вольт-

метра должно быть намного больше (в 100 раз или больше) максимального сопротивления R_x, а это ограничивает пределы измерения сверху.

В омметре с обратной шкалой напряжение на вольтметр снимают с образцового резистора R_0. Это напряжение

$$U = \frac{U_o}{1 + \frac{R_x}{R_o}}.$$

Одни и те же деления прямой и обратной шкал соответствуют сопротивлениям, значения которых являются обратными величинами. Это хорошо видно из рис. 61, где кривая 1 показывает прямую, а кривая 2 обратную шкалу. В омметре с обратной шкалой возможно измерение больших сопротивлений, чем в омметрах с прямой шкалой. Условие $U_о = U_п$ в омметрах с обратной шкалой проверяют при замкнутых накоротко входных зажимах.

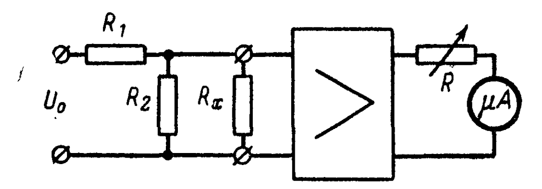


Рис. 62. Параллельная схема омметра.

На рис. 62 показана параллельная схема омметра. Измеряемый резистор R_x подключают к нижнему плечу делителя, состоящего из резисторов R_1 и R_2. Напряжение с нижнего плеча поступает на вход электронного вольтметра. Делитель подбирают так, что при $R_x = \infty$ стрелка индикатора μA отклоняется на всю шкалу, т. е. $U_о R_2/(R_1 + R_2) = U_п$. Нуль устанавливают при замкнутых накоротко входных зажимах. Напряжение на входе вольтметра

$$U = \frac{U_п}{1 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \frac{1}{R_x}}.$$

Это выражение полностью совпадает с выражением для омметра с прямой шкалой, если считать $R_1 R_2/(R_1 + R_2) = R_о$. Параллельную схему применяют при более высоком по сравнению с верхним пределом измерения вольтметра напряжении источника питания.

Омметры с равномерной шкалой. Неравномерность шкалы рассмотренных омметров является их недостатком (равномерная шкала более удобна для отсчетов). Чтобы получить равномерную шкалу, измерительную цепь нужно питать от источника тока, а не напряжения. Если, например, в омметре, схема которого была показана на рис. 60, взять образцовый резистор с сопротивлением, в сто или более раз превышающим максимально возможное значение измеряемого сопротивления, то шкала омметра будет равномерной (линейной), так как $U = U_о R_x/R_о$. Разумеется, напряжение питания $U_о$ должно быть соответственно повышено. Индикаторный прибор в этом

случае защищают от перегрузок диодной цепью (перегрузка может быть при включении меньшего, чем необходимо, предела измерения).

Генератор тока можно собрать, например, на транзисторе, учитывая, что его коллекторный ток мало зависит от напряжения на коллекторе. Простейшая схема такого генератора показана на рис. 63. Если сопротивление в цепи эмиттера 5,1, 22, 100 или 470 *ком*, то ток коллектора соответственно 1 *ма*, 200, 25 или 6 *мка*, а сопротивление в цепи коллектора, при котором его ток уменьшается на 2,5% от начального значения, соответственно 2,18, 14,3, 195 или 330 *ком*.

Переход на тот или иной предел измерения в таком омметре осуществляется переключением предела измерения вольтметра или резистора в эмиттерной цепи транзистора или же одновременным переключением того и другого. Если, например, для измерения падения напряжения на измеряемом сопротивлении R_x воспользоваться вольтметром постоянного тока, схема которого была приведена на рис. 39, то можно выбрать шкалы 0—100 *ом*, 0—300 *ом*, 0—1 *ком*, 0—3 *ком*, 0—10 *ком* и 0—30 *ком* при токе коллектора на первых трех шкалах 1 *ма*, а на остальных 500, 200 и 100 *мка*. При этом падения напряжения будут 0,1; 0,3; 1, 1,5, 2 и 3 *в*, а входные сопротивления вольтметра — соответственно 50, 150, 500, 750 *ком*, 1 и 1,5 *Мом*.

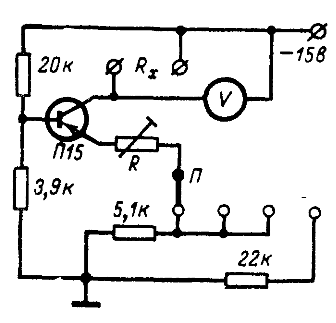


Рис. 63. Схема транзисторного омметра с равномерной шкалой.

Расширение пределов измерения в сторону бóльших сопротивлений при такой простой схеме невозможно из-за того, что входное сопротивление вольтметра становится недостаточным. В этом случае необходимо применить составной высоковольтный транзистор. Тогда допустимые изменения коллекторного напряжения будут значительно больше и пределы измерения могут быть расширены. Лучше всего для этого подходят кремниевые транзисторы с большим коэффициентом усиления по току. Потенциал базы транзистора должен быть стабилизирован.

Омметры с операционными усилителями. Операционные или решающие усилители, относящиеся к важнейшим элементам счетно-решающих и моделирующих устройств непрерывного действия, представляют собой высокостабильные усилители постоянного тока с параллельной обратной связью по напряжению. Свойства решающего усилителя позволяют с успехом использовать его для измерения сопротивлений в очень широких пределах.

Блок-схема решающего усилителя для измерения сопротивлений показана на рис. 64, *а*. Она содержит усилитель постоянного тока с нечетным числом усилительных каскадов (фаза выходного напряжения обратна фазе входного), на выходе которого включен индикаторный прибор μA. От усилителя требуется хорошая стабильность, и, кроме того, потенциал его выходного зажима (точка *Б*) при отсут-

ствии напряжения на входе должен быть равен нулю (можно использовать без изменений усилитель, схема которого была приведена на рис. 36). На вход усилителя через резистор R_1 подают постоянное напряжение $U_{вх}$, а выход усилителя соединяют с входом через резистор обратной связи R_2.

Обозначим коэффициент усиления усилителя с учетом влияния индикатора через K. Если учесть, что сам усилитель имеет некоторое входное сопротивление $R_{вх}$ и выходное сопротивление $R_{вых}$, то схема

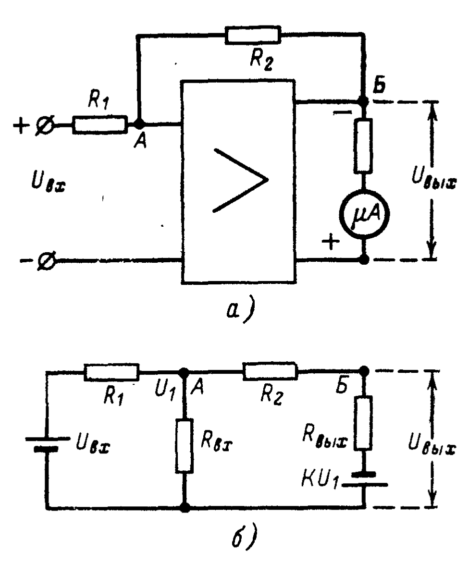


Рис. 64. Омметр с операционным усилителем.

а — функциональная блок-схема; *б* — схема замещения.

для его расчета будет выглядеть так, как это показано на рис. 64, *б*. Отсюда нетрудно найти потенциал входного зажима усилителя (точка A)

$$U_1 = \frac{U_{вх}}{1 + \frac{R_1}{R_{вх}} + \frac{R_1(1+K)}{R_2 + R_{вых}}}.$$

Выходное напряжение будет равно алгебраической сумме э. д. с. — KU_1 и падения напряжения на резисторе $R_{вых}$

$$U_{вых} = U_1(1+K)\frac{R_{вых}}{R_2 + R_{вых}} - KU_1.$$

Из этих двух выражений

$$U_{\text{вых}} = -U_{\text{вх}} \frac{R_2 - \frac{R_{\text{вых}}}{K}}{\frac{K+1}{K} R_1 + \frac{R_{\text{вых}}}{K}\left(1 + \frac{R_1}{R_{\text{вх}}}\right) + \frac{R_2}{K}\left(1 + \frac{R_1}{R_{\text{вх}}}\right)} \approx$$

$$\approx -U_{\text{вх}} \frac{R_2}{R_1}.$$

Посмотрим теперь, в каких пределах можно пользоваться приближенным равенством. Пусть $K = 100$ (худший случай), а $R_{\text{вых}} \approx 20$ *ом* (для рекомендованного усилителя $R_{\text{вых}} \approx 2/KS$, где S — крутизна выходной лампы). Отношения $R_{\text{вых}}/K$, как видим, ничтожно малы. Пренебрегая ими, получим следующие условия, при которых приближенное равенство справедливо: $R_{\text{вых}} \ll R_2 \ll KR_{\text{вх}}$. Множитель $(K+1)/K$ близок к единице (кроме того, он может быть учтен при градуировке соответствующей коррекцией). Эти условия означают, что включая измеряемое сопротивление R_x как резистор обратной связи R_2, мы будем иметь омметр с равномерной шкалой на пределы измерения примерно от 1 *ком* до $R_{\text{вх}}$, т. е. до 10^{12}—10^{14} *ом*. Переключать пределы измерения можно, изменяя значения R_1 и $U_{\text{вх}}$.

21. Мосты постоянного тока

Мостовой метод относится к числу наиболее совершенных и точных приемов электрических измерений. Вместе с тем этот метод достаточно прост. Больше всего распространен четырехплечий мост, который называется также одинарным в отличие от шестиплечего (двойного) моста, применяемого для измерения малых сопротивлений. Четырехплечим мостом постоянного тока можно измерять сопротивления от единиц ом до единиц мегом. Меньшие сопротивления нельзя измерять потому, что сопротивления подводящих проводников и контактные сопротивления зажимов оказываются сравнимыми с измеряемым сопротивлением, а бо́льшие потому, что, во-первых, сопротивление изоляции становится соизмеримым с измеряемым сопротивлением и шунтирует его, а, во-вторых, чувствительность моста с ростом измеряемого сопротивления падает. Специальные схемы и меры позволяют значительно расширить указанный диапазон, но в радиолюбительской практике этого обычно не требуется.

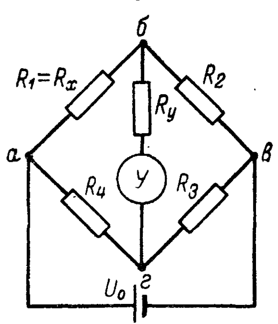


Рис. 65. Схема четырехплечего моста постоянного тока.

Четырехплечий мост (рис. 65) состоит из четырех последовательно соединенных резисторов R_1 — R_4, образующих замкнутый многоугольник, источника питания U_0, подключенного к вершинам *а* и *в*, и указателя равновесия *У* моста (гальванометра), подключенного к двум другим вершинам *б* и *г*. Резисторы R_1 — R_4 называют

плечами моста, цепь *а* — *в* диагональю питания, а цепь *б* — *г* диагональю указателя или измерительной диагональю.

Измеряемое сопротивление R_x включают обычно в первое плечо, так что $R_1 = R_x$, хотя в принципе выбор плеча для включения R_x безразличен. Одно из плеч, второе или третье, принимают за плечо сравнения, а два оставшихся называют плечами отношения. Будем считать плечом сравнения R_2, а плечами отношения R_3 и R_4 (смысл этих названий мы увидим из уравнения для измеряемого сопротивления). Сопротивление моста со стороны диагонали питания (при включенном указателе) называют входным, а со стороны измерительной диагонали выходным.

Из известных схем мы ограничимся рассмотрением одинарных уравновешенных мостов, в которых значение измеряемого сопротивления получается из соотношения, связывающего сопротивления всех плеч моста при отсутствии тока в измерительной диагонали, что достигается регулированием сопротивлений плеч моста. Процесс регулирования этих сопротивлений с целью приведения к нулю тока через указатель называют уравновешиванием.

При отсутствии тока в измерительной диагонали напряжение между точками *б* и *г* равно нулю. Это имеет место в том случае, если равны между собой, с одной стороны, падения напряжений на резисторах R_1 и R_4, а с другой, на резисторах R_2 и R_3, т. е. $I_1R_1 = I_4R_4$ и $I_2R_2 = I_3R_3$. Но при отсутствии тока через указатель $I_1 = I_2$ и $I_3 = I_4$. Тогда, поделив первое из уравнений на второе, получим $R_1/R_2 = R_4/R_3$, откуда

$$R_1 = R_2 \frac{R_4}{R_3}. \tag{5}$$

Плечо сравнения R_2 выполняют либо в виде многодекадного магазина сопротивлений, позволяющего достаточно плавно регулировать сопротивление, либо в виде проволочного потенциометра с высокой степенью линейности. Плечи отношения представляют собой набор резисторов, который позволяет менять значение R_4/R_3 в отношениях, обычно кратных 10, это очень упрощает подсчет R_x.

Момент равновесия фиксируется по отсутствию тока через указатель. Но отклонение сопротивления какого-либо плеча моста от значения, соответствующего состоянию равновесия, будет отмечено лишь в том случае, если вызванный этим отклонением ток в измерительной диагонали превысит порог чувствительности указателя. Поэтому всякий мост имеет область нечувствительности, и соответствующие границам этой области изменения R_x составляют погрешность измерения от нечувствительности моста.

В зависимости от того, судим ли мы о состоянии моста по току в диагонали указателя (указатель равновесия малого сопротивления, например, гальванометр или микроамперметр) или по напряжению на диагонали указателя (нулевой указатель с высоким входным сопротивлением, например, ламповый вольтметр), нас интересует чувствительность моста по току или напряжению.

Условия наивысшей чувствительности моста по току имеют вид:

$$R_2 = \sqrt{R_x R_y}, \quad R_3 \ll R_x \quad \text{и} \quad R_4 \ll R_x,$$

где R_y — сопротивление указателя.

Очевидно, что эти условия, особенно первое, могут быть выполнены в пределах всего диапазона измерения R_x лишь приблизительно, однако чувствительность моста вблизи максимума меняется не резко.

Допустим, что для моста выполнены условия, близкие к оптимальным, т. е. сопротивления трех плеч моста намного меньше измеряемого сопротивления и мост уравновешен при некотором значении R_x. В этом случае изменение R_x на величину ΔR_x вызовет появление в измерительной диагонали тока

$$\Delta I_у = U_0 \frac{\Delta R_x}{R_x} \frac{1}{R_x}. \tag{6}$$

Если понимать под $\Delta I_у$ порог чувствительности нулевого указателя, а под $\Delta R_x/R_x$ заданную погрешность от нечувствительности, то это соотношение может служить расчетным при выборе нулевого указателя и напряжения питания по максимальному измеряемому сопротивлению. Например, предполагается измерять сопротивления до 1 *Мом* с погрешностью от нечувствительности не более 1%. Возьмем в качестве индикатора микроамперметр типа М132 со шкалой 5—0—5 *мка*. Так как число делений шкалы у него равно 20, а глаз отчетливо регистрирует перемещение указателя примерно на одну пятую длины деления, то порог чувствительности указателя по току будет 0,05 *мка*. Тогда для питания моста необходимо взять источник напряжением 10 *в*, чтобы не превысить заданную погрешность от нечувствительности в 1%.

Уменьшение измеряемых сопротивлений влечет за собой снижение погрешности от нечувствительности. Пропорциональность между ними исчезает только в связи с нарушением условий для R_2, R_3 и R_4, а оно неизбежно вследствие того, что сопротивления плеч сравнения и отношения не могут быть взяты произвольно малыми (из-за конструктивных ограничений, влияния различных переходных сопротивлений, нежелательности потребления большого тока от источника питания). При сравнимых сопротивлениях плеч необходимый порог чувствительности нулевого указателя

$$\Delta I_у = U_0 \frac{\frac{\Delta R_x}{R_x}}{R_у\left(1+\frac{R_2}{R_x}\right)\left(1+\frac{R_4}{R_3}\right)+R_2\left(1+\frac{R_4}{R_3}\right)+R_4\left(1+\frac{R_2}{R_x}\right)}. \tag{7}$$

При этом предполагается, что сопротивление источника питания малó по сравнению с входным сопротивлением моста, что обычно и имеет место при питании моста напряжением.

По формуле (6) удобно производить быструю прикидку параметров схемы, а по формуле (7) производить окончательный расчет моста.

Если сопротивление указателя велико (например, у лампового вольтметра), то выходной величиной мостовой схемы считают напряжение на измерительной диагонали $U_{бг} = I_у R_у$. Чтобы найти чувствительность по напряжению мостовой схемы в точке равновесия, умножим обе части предыдущего выражения на $R_у$, а затем разделим на $R_у$ числитель и знаменатель правой части и, положив $R_у = \infty$,

получим:

$$\Delta U_{бг} = U_0 \frac{\dfrac{\Delta R_x}{R_x}}{\left(1 + \dfrac{R_2}{R_x}\right)\left(1 + \dfrac{R_4}{R_3}\right)}.$$

Правая часть этого выражения достигает наибольшего значения при минимальном знаменателе. Вследствие того, что для уравновешенного моста увеличение R_2/R_x влечет за собой уменьшение R_4/R_3 (и наоборот), минимальное значение знаменатель имеет при $R_2/R_x = R_4/R_3 = 1$. Это означает, что условие наивысшей чувствительности по напряжению заключается в попарном равенстве плеч, т. е. при $R_1 = R_2$ и $R_3 = R_4$. При этом сами резисторы R_3 и R_4 могут быть небольшого сопротивления. Отсюда наивысшая чувствительность по напряжению

$$\Delta U_{бг.\ макс} = \frac{1}{4} \frac{\Delta R_x}{R_x} U_0.$$

Здесь, как и прежде, под $\Delta U_{бг}$ понимают порог чувствительности указателя, но уже по напряжению.

Допустим, указателем служит ламповый вольтметр постоянного тока с порогом чувствительности 0,1 *в* (это довольно грубый вольтметр). Тогда сопротивление в 1 *Мом* будет измерено с погрешностью не свыше 1%, если напряжение питания моста будет 40 *в* или больше. Чувствительность моста от измеряемого сопротивления R_x зависит относительно слабо, и поэтому следует обратить внимание при расчете на то, чтобы рассеиваемая резисторами мощность не превышала номинальную для них. При необходимости применяют переключение напряжения питания.

Погрешность от нечувствительности в 1% означает, что, например, все резисторы сопротивлением от 990 до 1 010 *ком* мы измерим как резистор в 1 *Мом*. Но это будет при условии, что сопротивления образцовых резисторов R_2, R_3 и R_4 точно соответствуют своим номинальным значениям. Однако каждый резистор неизбежно имеет некоторое отклонение от своего номинального значения (или от измеренного значения, поскольку измерение сопротивлений всегда сопровождается погрешностью). Поэтому момент равновесия соответствует не тем сопротивлениям плеч, которые мы подставляем в выражение (5), а несколько иным, в связи с чем вычисленное значение измеряемого сопротивления отличается от действительного. Предельное значение погрешности от неточности подгонки плеч равно сумме относительных погрешностей всех резисторов, а полная предельная погрешность определяется суммой погрешностей от нечувствительности и неточности подгонки.

С помощью формул, приведенных в этом параграфе, нетрудно рассчитать четырехплечую мостовую схему для измерения сопротивлений на постоянном токе. Указателем равновесия удобно использовать электронный вольтметр, но можно применять и чувствительные микроамперметры, включая их непосредственно или через транзисторный усилитель тока. В мосте обязательно должен быть предусмотрен элемент регулировки чувствительности указателя равновесия, например регулируемый шунт. Это предохранит указатель от повреждения при большом разбалансе моста.

На рис. 66 показан внешний вид четырехплечего моста типа УМВ. Он имеет пределы измерения от 0,01 *ом* до 1 *Мом*. Погрешность измерения при правильно выбранных напряжении питания и плечах отношения не превышает ± 0,5% от измеряемого сопротивления и ± 5% для сопротивлений ниже 1 *ом* и выше 100 *ком*. Наивыгоднейшее соотношение плеч R_4/R_3 и напряжение источника питания моста U_0 в зависимости от измеряемого сопротивления R_x таково: при R_x от 0 до 1 *ом*, от 1 до 10 *ом*, от 10 до 100 *ом*, от 100 *ом* до 1 *ком*, от 1 до 10 *ком*,

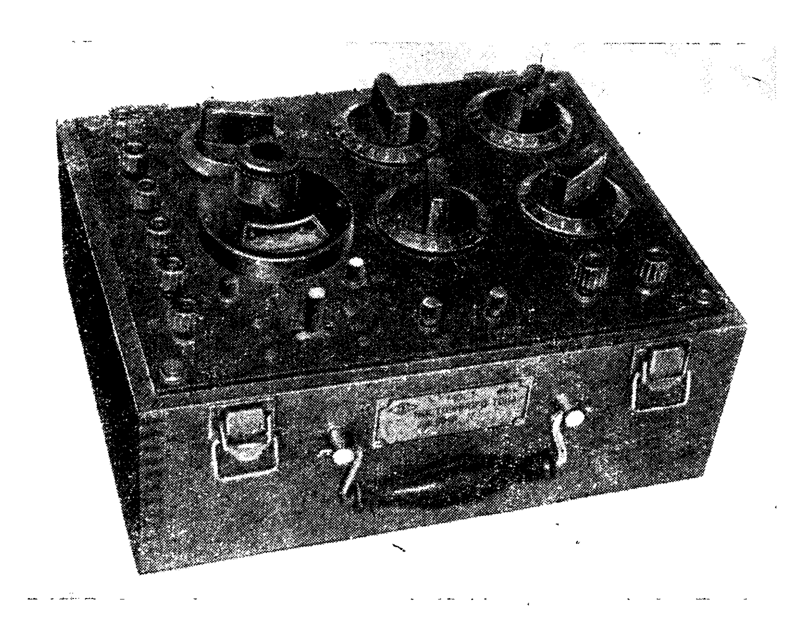
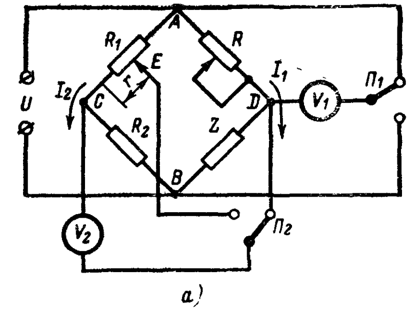


Рис. 66. Измерительный мост типа УМВ.

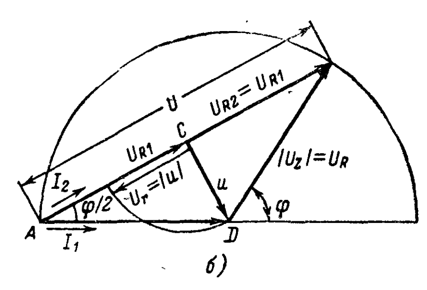
от 10 до 100 *ком* и от 100 *ком* до 1 *Мом* напряжение U_0 соответственно 2, 4, 4, 6, 8, 20 и 20 *в*, а отношение R_4/R_3 соответственно 1/1 000, 1/1 000, 1/100, 1/10, 1/1, 10/1 и 100/1.

Плечо сравнения моста выполнено в виде рычажного магазина сопротивлений, состоящего из четырех последовательно соединенных между собой групп резисторов. Каждая из этих групп, управляемая отдельным рычажным переключателем, состоит в свою очередь из девяти резисторов с одинаковыми, точно подогнанными, сопротивлениями в 1, 10, 100 *ом* и 1 *ком*. Таким образом, плечо сравнения дает возможность набрать любое сопротивление в интервале от 1 до 9999 *ом* ступенями через 1 *ом*. Плечи R_3 и R_4 выполнены также в виде группы резисторов, управляемой одним рычажным переключателем. Каждому положению этого переключателя соответствует определенное отношение R_4/R_3, которое прямо отсчитывается по обозначениям на лимбе рукоятки переключателя. Значение

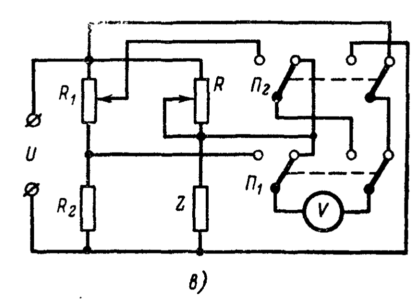
измеряемого сопротивления в омах получается путем умножения полученного отношения R_4/R_3 на сопротивление плеча сравнения при равновесии моста. Указателем равновесия служит стрелочный магнитоэлектрический гальванометр с подвижной частью на растяжках и нулем посредине шкалы.



а)



б)



в)

Рис. 67. Мост для измерения комплексных сопротивлений.

а — принципиальная схема моста; *б* — векторная диаграмма; *в* — схема моста с одним вольтметром.

22. Измерение комплексных сопротивлений

Сопротивление переменному току многих элементов цепей, например катушек индуктивности, состоит из активной и реактивной составляющих. При помощи только что рассмотренных четырехплечих мостов постоянного тока возможно измерение лишь активного сопротивления элемента цепи. Комплексные же (полные) сопротивления измеряют на мостах переменного тока, которые содержат не только образцовые резисторы, но и образцовые реактивные элементы, чаще всего конденсаторы. Между тем сравнительно мало известно, что четырехплечий мост, собранный только из резисторов и питаемый переменным напряжением, пригоден для измерения комплексных сопротивлений.

Схема такого моста показана на рис. 67, *а*. Измеряемое сопротивление обозначено здесь через Z. Остальные плечи моста состоят из непроволочных резисторов, у которых собственные индуктивности и емкости незначительны. При необходимости более или менее точных измерений плечо R выполняют в виде нескольких декад резисторов, при небольших же требованиях к точности применяют

непроволочный потенциометр с лимбом, проградуированным в единицах сопротивления. Резистор R_2 берут равным по сопротивлению с потенциометром R_1, так что напряжение питания моста делится на них пополам. Напряжения измеряют электронными вольтметрами V_1 и V_2 с высоким входным сопротивлением (оно должно быть намного выше сопротивления Z). Напряжение питания U подается на мост от RC-генератора. Ток, протекающий по правой ветви моста (через R и Z), мы обозначим через I_1, а по левой — через I_2 и будем считать, что входная цепь вольтметров не потребляет тока.

При помощи этого моста сначала определяют модуль комплексного сопротивления, а затем его фазовый угол. Для измерения модуля неизвестного комплексного сопротивления резистор R устанавливают так, чтобы падение напряжения на нем было равно падению напряжения на сопротивлении Z, что означает равенство установленного сопротивления R и искомого модуля $z = |Z| = R$. Для этого вольтметр V_1 подключают переключателем $П_1$ попеременно к плечу R и к плечу Z и, регулируя сопротивление R, добиваются одинаковых показаний вольтметра.

Чтобы получить фазовый угол φ измеряемого комплексного сопротивления, обратимся к векторной диаграмме моста на рис. 67,*б*, которая справедлива при $z = R$. Напряжение U_R на резисторе R находится в фазе с током I_1, а напряжение U_Z равно по значению напряжению U_R, но сдвинуто относительно него (на диаграмме U_Z опережает U_R, что соответствует индуктивному характеру Z) на угол φ, так что конечная точка B вектора напряжения U_Z лежит на окружности радиуса U_R, проведенной из центра D. Вектор питающего напряжения замыкает точки A и B, поскольку $U = U_R + U_Z$. Падения напряжений на R_1 и R_2 равны между собой ($R_1 = R_2$) и находятся в фазе с напряжением U, в связи с чем точка C лежит посредине вектора этого напряжения. Так как треугольники ACD и BCD равны, то угол между напряжениями U_{AD} и U_{DC} равен $90° - \frac{\varphi}{2}$, а угол между U_{AC} и U_{AD}, следовательно, будет $\varphi/2$. Из треугольника ACD получается, что тангенс половины фазового угла равен отношению напряжения на измерительной диагонали моста к напряжению на потенциометре R_1, т. е.

$$\operatorname{tg}\frac{\varphi}{2} = \frac{U_{CD}}{U_{CA}}. \tag{8}$$

Хотя фазовый угол в соответствии с этим выражением можно рассчитать по измеренным напряжениям U_{CD} и U_{CA}, однако рекомендуется иной метод его определения, так как прямое использование выражения (8) связано с большими ошибками в определении φ, вызываемыми погрешностями прямых измерений напряжений. Для этого при помощи переключателя $П_2$ и вольтметра V_2 измеряют попеременно напряжения между точками C и E и C и D и, регулируя потенциометр R_1, добиваются одинаковых показаний вольтметра при обоих положениях переключателя. Напряжение между движком потенциометра и вершиной моста C в этом случае окажется равным напряжению на измерительной диагонали CD, т. е. $U_{CE} = U_{CD}$.

Заменив в выражении (8) U_{CD} через U_{CE}, получим:

$$\operatorname{tg}\frac{\varphi}{2}=\frac{U_{CE}}{U_{CA}}=\frac{r}{R_1}.$$

Из этого выражения видно, что тангенс половины фазового угла равен отношению сопротивления части потенциометра между движком и точкой C к полному сопротивлению потенциометра. Отсюда

$$\varphi = 2\operatorname{arctg}\frac{r}{R_1}.$$

Это соотношение изображено графически на рис. 68. Оно сравнительно мало отличается от прямой. Потенциометр R_1 может быть проградуирован непосредственно в единицах фазового угла φ, причем шкала будет близка к линейной. Таким образом, рассмотренный нами мост позволяет получать непосредственный отсчет как модуля, так и фазового угла.

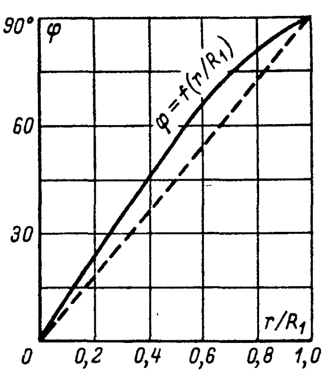


Рис. 68. Зависимость тангенса фазового угла комплексного сопротивления от отношения r/R_1.

В схеме на рис. 67, *а* показаны два вольтметра. В практическом выполнении моста обходятся только одним вольтметром (рис. 67, *в*). Для этого применяют двухполюсные переключатели на два направления. Переключателем $П_1$ переключают вольтметр на измерении модуля (вправо) или фазы (влево), а переводом переключателя $П_2$ из одного положения в другое сравнивают напряжения. Если мост собирается для разовых измерений, то можно отказаться и от переключателей.

Напомним, что активная R и реактивная X составляющие комплексного сопротивления Z определяются через модуль z и фазовый угол φ следующим образом: $R = z\cos\varphi$, а $X = z\sin\varphi$. При индуктивном характере сопротивления $X = \omega L$, а при емкостном $X = 1/\omega C$.

23. Мосты переменного тока

Мостовые схемы, питаемые переменным током и содержащие, кроме активных, и реактивные образцовые сопротивления, широко применяются для измерения индуктивностей, взаимных индуктивностей, емкостей и активных сопротивлений. По своей структуре четырехплечий мост переменного тока отличается от постоянного только тем, что в общем случае сопротивления его плеч комплексны, а это приводит к необходимости учета фазовых соотношений. Для равновесия моста переменного тока необходимо не только равенство произведений модулей полных сопротивлений противолежащих плеч, но и равенство сумм их фазовых углов, т. е. $\mathbf{z}_1\mathbf{z}_3 = \mathbf{z}_2\mathbf{z}_4$ и $\varphi_1 + \varphi_3 =$

$= \varphi_2 + \varphi_4$. Только при этом напряжение на измерительной диагонали будет равно нулю.

Из условия равенства сумм фазовых углов следует, что если в двух смежных плечах моста включены активные сопротивления, например $Z_1 = R_1$ и $Z_2 = R_2$ (угол $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$), то в двух других его плечах должны быть включены однородные сопротивления, например две индуктивности (углы φ_3 и φ_4 положительны), две емкости (углы φ_3 и φ_4 отрицательны) или два резистора (угол $\varphi_3 = \varphi_4 = 0$). Наоборот, если активные сопротивления включены в два противоположных плеча, например $Z_1 = R_1$ и $Z_3 = R_3$ (угол $\varphi_1 = \varphi_3 = 0$), то в двух других противоположных плечах моста должны быть включены сопротивления разного характера: в одном емкость, а в другом индуктивность.

Комплексное сопротивление имеет активную R и реактивную X составляющие. Естественно, что мост переменного тока содержит, кроме активного образцового сопротивления, еще и реактивный образцовый элемент. Как правило, это конденсатор, потому что изготовление образцовых катушек индуктивности с малыми потерями затруднительно. В отличие от мостов постоянного тока уравновешивание моста переменного тока осуществляется по двум величинам: модулю и фазе. Условие равновесия моста представляет собой систему двух уравнений,которые должны быть удовлетворены одновременно:

$$\left.\begin{aligned} R_1 R_3 - X_1 X_3 &= R_2 R_4 - X_2 X_4; \\ X_1 R_3 + X_3 R_1 &= X_2 R_4 + X_4 R_2. \end{aligned}\right\} \qquad (9)$$

Здесь через X с индексом обозначено реактивное сопротивление соответствующего плеча в последовательной схеме замещения, причем $X = \omega L - (1/\omega C)$. Уравновешивание моста по двум величинам требует наличия в его схеме не менее двух регулируемых элементов. Для удобства выбирают такое построение схем, при котором этими элементами служат резисторы.

Промышленность выпускает универсальный измерительный мост типа Е12-2 (УМ-3). Этот мост предназначен для измерения сопротивлений в диапазоне 0,1 *ом* — 5 *Мом*, емкостей в диапазоне 10 *пф* — 100 *мф* и индуктивностей в диапазоне 10 *мкгн* — 100 *гн*, причем все эти диапазоны перекрываются семью поддиапазонами. Кроме этого, можно измерять тангенсы углов потерь конденсаторов от 0,001 до 0,1 и добротности катушек от 1 до 100. Измерение сопротивлений производится на постоянном токе, а емкостей и индуктивностей на частотах 100 *гц* и 1 *кгц*. Индуктивности можно измерять и на других частотах при питании моста от внешнего генератора.

Основная погрешность измерения сопротивлений R (в омах) составляет не более $\pm (1 + 2/R)\%$ для сопротивлений от 0,1 *ом* до 1 *Мом* и $\pm 3\%$ для сопротивлений от 1 до 5 *Мом*. Основная погрешность измерения емкостей C (в процентах) от 10 *пф* до 10 *мф* на частоте 1 *кгц* составляет не более $\pm (1 + 200/C)\%$, а измерения емкостей от 10 до 100 *мф* на частоте 100 *гц* — не более $\pm 3\%$. Основная погрешность измерения индуктивностей L (в микрогенри) от 10 *мкгн* до 1 *гн* на частоте 1 *кгц* составляет не более $\pm\left(1 + \frac{200}{L}\right)\%$, индуктивностей от 1 до 10 *гн* на частоте 100 *гц* — не более $\pm 1\%$ и индуктивностей от 10 до 100 *гн* на частоте 100 *гц* — не более $\pm 3\%$.

Основная погрешность измерения тангенса угла потерь $\operatorname{tg}\delta$ не более $\pm(10+0,1/\operatorname{tg}\delta)\%$, а измерения добротности Q катушек — не более $\pm(10+0,1\,Q)\%$.

На рис. 69 приведены схемы измерительной части этого моста. При измерении сопротивлений схема представляет собой обычный четырехплечий мост постоянного тока (рис. 69, *а*), который мы уже рассматривали, а при измерении емкостей и индуктивностей два из четырех плеч моста являются комплексными.

Схема моста для измерения емкостей показана на рис. 69, *б*. Измеряемая емкость представлена здесь в виде C_x и R_x в последовательной схеме замещения и включена в первое плечо моста. Второе *1—2* и третье *3—4* плечи состоят из активных сопротивлений, а в четвертое, которое служит для уравновешивания моста по фазе, включены образцовый конденсатор C_4 и переменное сопротивление R_4.

Подставив в выражения (9) $X_1 = -1/\omega C_x$, $X_4 = -1/\omega C_4$ и $X_2 = X_3 = 0$, получим следующие уравнения равновесия данного моста:

$$R_x = \frac{R_2 R_4}{R_3}; \quad C_x = C_4 \frac{R_3}{R_2}. \tag{10}$$

При измерении конденсаторов интересует обычно не сопротивление его потерь в последовательной схеме замещения, а тангенс угла потерь $\operatorname{tg}\delta$, показывающий соотношение между активным и реактивным сопротивлениями: $\operatorname{tg}\delta = \omega C_x R_x$. Подставив сюда вместо R_x и C_x их значения из уравнений (10), получим:

$$\operatorname{tg}\delta = \omega R_4 C_4.$$

Из выражений для C_x и $\operatorname{tg}\delta$ видно, что при уравновешивании моста резисторами R_3 и R_4 получается раздельный отсчет по измеряемым емкости C_x и тангенсу угла потерь $\operatorname{tg}\delta$. При этом резистор R_3 градуирован в единицах емкости, а R_4 в значениях $\operatorname{tg}\delta$. Оба этих резистора выполнены в виде реохордов.

Во второе плечо *1—2* моста включены семь резисторов (по числу поддиапазонов) с переключателем Π_1 (рис. 69, *д*), ручка которого обозначена как «множитель». Третье плечо *3—4* (отсчетное для емкости) состоит из четырех резисторов постоянного сопротивления и реохорда (рис. 69, *е*). Переключателем Π_2 сопротивление этого плеча изменяют ступенями через 1 *ком*, а реохордами мост уравновешивают плавно. В четвертое плечо, служащее для компенсации сдвига фаз при наличии потерь в измеряемом конденсаторе, включается градуированный в значениях тангенса угла потерь реохорд R_4 сопротивлением 164 *ом* и образцовый конденсатор C_4 емкостью 0,1 *мф* при работе моста на частоте 1 *кгц* или емкостью 1 *мф* при работе на частоте 100 *гц*.

Схема моста для измерения катушек индуктивности с добротностями выше 30 показана на рис. 69, *в*, а схема для измерения катушек с низкой добротностью — на рис. 69, *г*. Для схемы на рис. 69, *в* условия равновесия моста определяются как

$$L_x = \frac{R_2 R_4}{1 + (\omega R_3 C_3)^2} \text{ и } R_x = \frac{R_2 R_3 R_4 \omega^2 C_3^2}{1 + (\omega R_3 C_3)^2}.$$

Добротность катушки равна отношению реактивного ее сопротивления к активному, т. е. $Q = \omega L_x / R_x$. Подставив сюда значения L_x

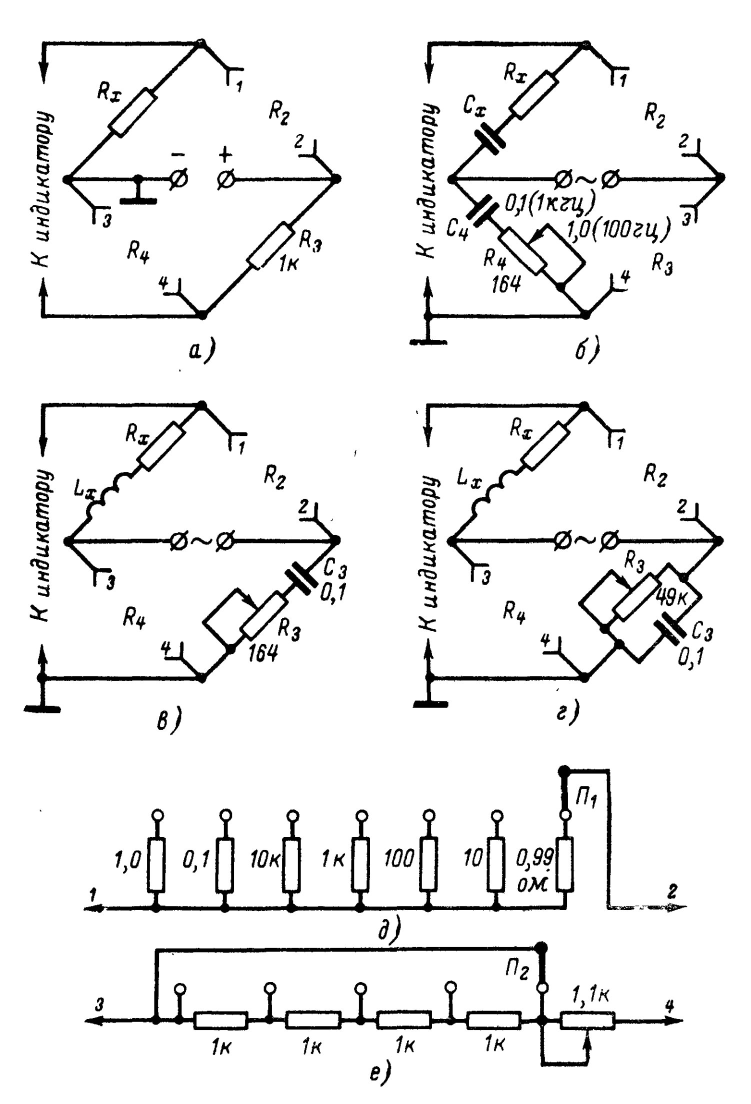


Рис. 69. Схемы измерительной части моста Е12-2.

а — при измерении сопротивлений; *б* — при измерении емкостей; *в* — при измерении катушек индуктивности с добротностью выше 30; *г* — то же с низкой добротностью; *д* — второе плечо моста; *е* — третье (при измерении емкости) или четвертое (при измерении сопротивления и индуктивности) плечо моста.

и R_x, получим:

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} = \frac{1}{\omega R_3 C_3},$$

а отсюда индуктивность

$$L_x = \frac{R_2 R_4 C_3}{1 + \frac{1}{Q^2}}.$$

Для катушек высокой добротности отношение $1/Q^2$ незначительно по сравнению с единицей, поэтому можно считать

$$L_x = R_2 R_4 C_3.$$

Из полученных выражений видно, что при уравновешивании моста резисторами R_3 и R_4 мы получаем раздельный отсчет по индуктивности и добротности. Определяя добротность, отсчет берут по шкале $\operatorname{tg} \delta$ и находят ее как обратную величину тангенса угла потерь.

Для схемы на рис. 69, *г* условия равновесия моста определяются как

$$L_x = R_2 R_4 C_3 \quad \text{и} \quad Q = \omega R_3 C_3.$$

Органы уравновешивания у него те же, что и у моста по схеме на рис. 69, *в*, но реохорд R_3 сопротивлением 49 *ком* в третьем плече включен параллельно образцовому конденсатору C_3. Активное сопротивление катушки

$$R_x = \frac{\omega L_x}{Q} = \frac{R_2 R_4}{R_3}.$$

Генератор моста Е12-2 выполнен на лампе 6С1П по схеме с контуром в цепи катода и автотрансформаторной связью на сетку. Его колебательный контур образован первичной обмоткой трансформатора и конденсатором постоянной емкости. Колебания генератора с частотой 1 *кгц* усиливаются лампой 6П1П по трансформаторной схеме. Этот усилитель устраняет влияние изменения нагрузки моста на генератор. Напряжение частотой 100 *гц* получается удвоением частоты электросети 50 *гц*. В качестве удвоителя используется мостовая схема двухполупериодного выпрямителя на германиевых диодах Д2Д. Полученная гармоника 100 *гц* фильтруется тремя цепями *RC*. Указатель равновесия моста состоит из трехкаскадного усилителя (на лампах 6Ж4П, 6Н1П, 6К4П) и индикаторного прибора (микроамперметр типа М494). Избирательность усилителя на частотах 100 *гц* и 1 *кгц* осуществляется путем применения двух двойных Т-образных мостов. Усилитель имеет автоматическую регулировку усиления (при подходе к положению равновесия чувствительность его повышается). Внешний вид универсального моста Е12-2 показан на рис. 70.

При самостоятельном изготовлении универсальных мостов не следует пытаться копировать довольно сложные промышленные приборы. Более простые схемы тоже дают удовлетворительные результаты. Вместе с тем они проще в изготовлении и наладке. Одна

из таких схем для самостоятельного изготовления моста приведена на рис. 71. Измерительная часть этой схемы подобна схеме моста Е12-2. При помощи переключателя $П_1$ можно получить мост для измерения сопротивлений, мост для измерения емкостей и два моста для измерения катушек индуктивности. В схеме предусмотрено измерение сопротивлений как на постоянном, так и на переменном токе.

Пределы измерения и частоту генератора (лампа 6П14П) выбирают в зависимости от имеющихся у радиолюбителя образцовых резисторов и конденсаторов. Рассчитать схему можно по приведенным выше формулам.

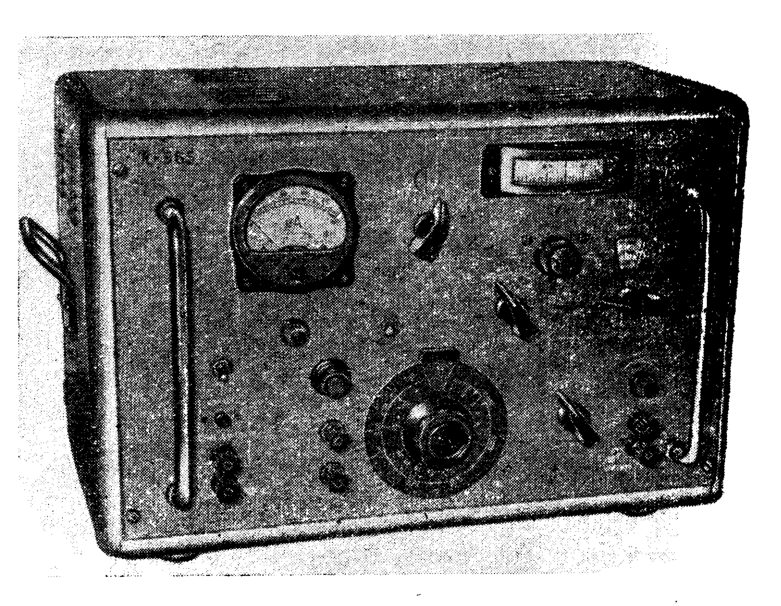


Рис. 70. Мост типа Е12-2.

Избирательные свойства усилителю придает колебательный контур в анодной цепи первой лампы 6Ж1П. Его катушку L наматывают на стальном или ферритовом сердечнике. Если частота питания моста выбирается порядка 400 *гц* и ниже, то в качестве избирательного элемента лучше применить двойной Т-образный мост. Потенциометр R_1 служит для регулировки чувствительности моста в процессе измерений. Перед началом измерений устанавливают небольшую чувствительность и увеличивают ее по мере подхода к положению равновесия. При измерении сопротивлений на постоянном токе индикатор включается непосредственно в измерительную диагональ моста, а чувствительность изменяют резистором R_2. Переключение индикатора и питания моста с переменного тока на постоянный производится при помощи переключателя $П_3$.

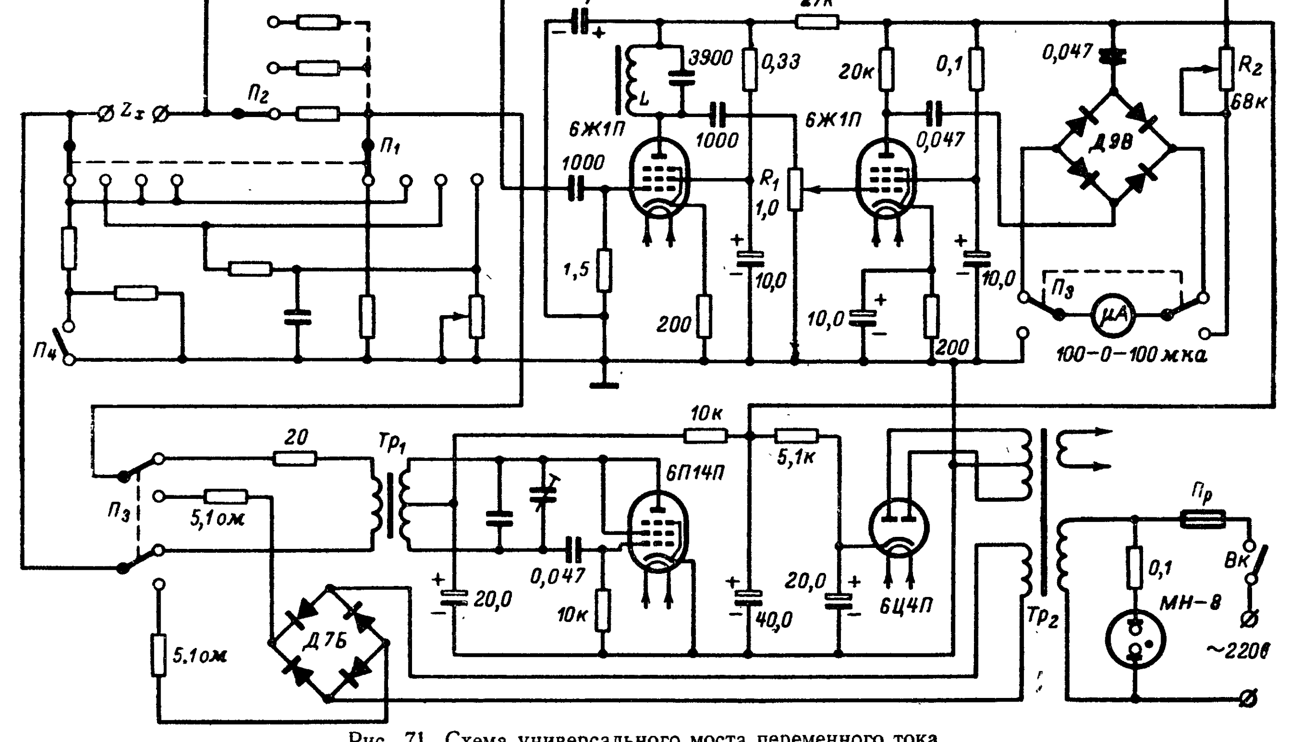


Рис. 71. Схема универсального моста переменного тока.

24. Трансформаторные мосты

Четырехплечие мосты переменного тока имеют ряд следующих недостатков: 1) ограниченный диапазон измерений, 2) необходимость большого количества образцовых элементов, 3) трудность измерения сопротивлений непосредственно в схеме без их отпайки и 4) влияние на результат паразитных емкостей и индуктивностей при точных измерениях и связанная с этим необходимость тщательной экранировки и специального регулируемого заземления. От этих недостатков в значительной степени избавлены мосты с индуктивно связанными плечами, называемые также трансформаторными мостами.

Принципиальная схема трансформаторного моста показана на рис. 72. Неизвестное (измеряемое) комплексное сопротивление обозначено здесь через $Z_и$, а образцовое сопротивление через Z_0. Первичная обмотка трансформатора $Тр_1$, являющегося трансформатором напряжения, подключается к источнику питания. Вторичная обмотка этого трансформатора состоит из двух секций с числом витков $N_и$ и N_0. Эта обмотка соединена через сопротивления $Z_и$ и Z_0 с первичной обмоткой трансформатора $Тр_2$, являющегося трансформатором тока. Последняя тоже состоит из двух секций с числом витков $n_и$ и n_0.

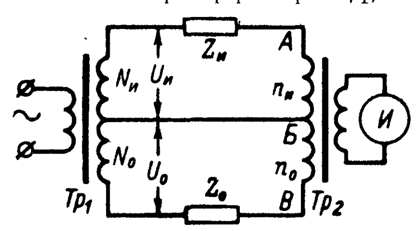


Рис. 72. Принципиальная схема трансформаторного моста.

Вторичная обмотка трансформатора $Тр_2$ подключена к индикатору $И$. Напомним, что трансформаторы напряжения работают при постоянном значении магнитного потока на относительно большую нагрузку. Трансформаторы же тока нагружены на малое сопротивление, которое, будучи пересчитано на вход трансформатора, оказывается намного меньше сопротивления источника. Поэтому выходной величиной трансформатора тока считают не напряжение, а ток. Магнитный поток такого трансформатора изменяется с нагрузкой, а первичные ампер-витки идеального трансформатора тока всегда равны вторичным его ампер-виткам, т. е. $I_1 n_1 = I_2 n_2$, откуда ток во вторичной цепи $I_2 = I_1 n_1 / n_2$. В одном из трансформаторов моста направления витков обмотки секций должны быть встречными.

Предположим, что оба трансформатора моста идеальны, а образцовое сопротивление Z_0 установлено таким, что ток через индикатор равен нулю. Это означает, что магнитный поток в сердечнике трансформатора тока отсутствует и на его обмотках не наводится никакой э. д. с. Тогда точки $А$, $Б$ и $В$ имеют один и тот же потенциал и

$$I_и = \frac{U_и}{Z_и}, \quad а \quad I_0 = \frac{U_0}{Z_0},$$

где $U_и$ и U_0 — напряжения на измеряемом и образцовом сопротивлениях соответственно. Так как при нулевом магнитном потоке в сердечнике трансформатора $Тр_2$ ампер-витки обоих секций его

первичной обмотки одинаковы, т. е. $I_{и}n_{и} = I_{о}n_{о}$, то

$$\frac{U_{и}}{Z_{и}} n_{и} = \frac{U_{о}}{Z_{о}} n_{о},$$

откуда

$$Z_{и} = \frac{U_{и}}{U_{о}} \frac{n_{и}}{n_{о}} Z_{о}.$$

Для идеального трансформатора напряжения отношение напряжений $U_{и}/U_{о}$ равно отношению витков $N_{и}/N_{о}$. Следовательно,

$$Z_{и} = \frac{N_{и}}{N_{о}} \frac{n_{и}}{n_{о}} Z_{о}.$$

Это уравнение равновесия показывает, что, в отличие от обычных мостов, трансформаторный мост позволяет изменять два отношения ($N_{и}/N_{о}$ и $n_{и}/n_{о}$), что существенно расширяет диапазон измерений.

Трансформаторный мост позволяет выполнять независимые измерения активной и реактивной составляющих комплексного сопротивления. На рис. 73 измеряемое $Z_{и}$ и образцовое $Z_{о}$ сопротивления представлены параллельными схемами замещения. Активный и реактивный токи могут быть уравновешены раздельно, поэтому образцовую активную проводимость $G_{о}$ (реально это резистор) и образцовую реактивную проводимость $X_{о}$ можно присоединить к разным отводам трансформаторов с тем, чтобы уравновесить токи через измеряемую комплексную проводимость. Эта схема дает возможность измерения одной составляющей без одновременного уравновешивания другой, иначе говоря, такой мост допускает раздельное уравновешивание. У тех четырехплечих мостов, которые мы рассмотрели выше, этого свойства нет. Положение равновесия достигается у них после нескольких попеременных регулировок переменных элементов. Термин «раздельный отсчет», который нам встречался, характеризует способ снятия показаний, а это означает, что переменный элемент моста может быть градуирован в величинах измеряемого параметра, так как в другое условие равновесия он не входит. Раздельное же уравновешивание означает, что уравновешивание моста по одному параметру достигается независимо (или почти независимо) от другого.

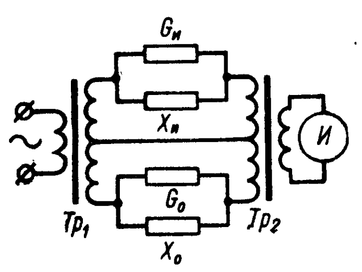


Рис. 73. Представление комплексных сопротивлений параллельными схемами замещения.

Трансформаторный мост допускает применение образцовых реактивных элементов невысокой добротности. Влияние потерь, например, в катушке индуктивности компенсируют включением подходящего сопротивления к соответствующему отводу трансформатора в измерительном плече, и на измерении индуктивности это не отражается.

Образцовые сопротивления трансформаторного моста должны быть того же характера, что и измеряемое, например, при измере-

нии конденсаторов это должен быть конденсатор, а при измерении индуктивностей индуктивность. Схема позволяет использовать меры с постоянным и переменным значениями. Набор мер с постоянным значением применяют при необходимости получения точных отсчетов. На рис. 74 показано включение трех мер. Пусть мера Z_{01} содержит одну условную единицу, мера Z_{02} десятую часть условной единицы, а мера Z_{03} сотую часть единицы. Подключая меры к различным отводам вторичной обмотки трансформатора, число которых примем равным 10, мы можем менять относительное значение меры Z_{01} от 1 до 0,1, меры Z_{02} от 0,1 до 0,01 и меры Z_{03} от 0,01 до 0,001. Комбинируя подключение всех трех мер, можно измерить любое комплексное

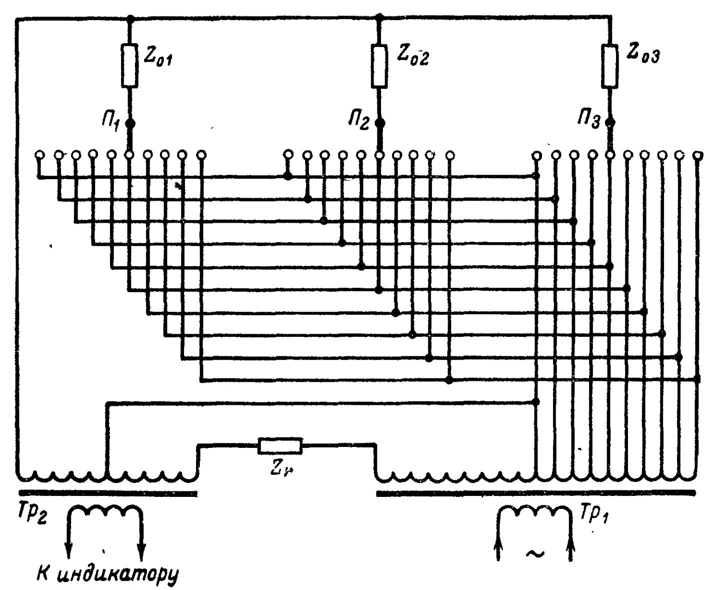


Рис. 74. Схема трансформаторного моста со ступенчатым переключением мер.

сопротивление $Z_и$ в пределах от 0,001 Z_0 до Z_0 с погрешностью в 0,001 Z_0. Для дальнейшего расширения пределов измерения без увеличения количества мер можно сделать отводы у левой по схеме (измерительной) секции обмотки трансформатора $Тр_1$ и менять место подключения $Z_и$. Точность же отсчета определяется количеством образцовых мер. При тщательном выполнении мост при таком построении схемы не требует градуировки.

Большое число переключателей делает процесс уравновешивания моста медленным и трудоемким. Поэтому в трансформаторных мостах для измерения емкостей применяют обычно образцовые конденсаторы переменной емкости C_0. Широкие пределы измерения позволяют использовать обычные конденсаторы настройки от радиоприемников. Отводы делают в обоих трансформаторах (рис. 75).

Образцовый резистор переменного сопротивления R_0 включают параллельно образцовому конденсатору. Сопротивление резистора берут равным емкостному сопротивлению конденсатора на рабочей частоте, но можно взять резистор и любого другого сопротивления, подключив его к соответствующему отводу обмотки трансформатора. Если применить в качестве образцового конденсатор с максимальной емкостью 1 000 *пф* (двухсекционный конденсатор настройки при параллельном включении его секций), то можно получить пределы измерения до 1, до 10, до 100, до 1 000 *пф*, до 0,01, до 0,1 и до 1 *мкф* при подключении измеряемой емкости соответственно к отводам трансформатора Tp_1 от 1000, 100, 100, 10, 10, 1 и 1-го витков его обмотки и к отводам от 1000, 1000, 100, 100, 10, 10 и 1-го витков обмотки трансформатора Tp_2.

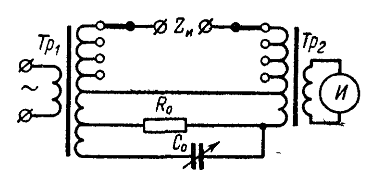


Рис. 75. Схема трансформаторного моста для измерения емкостей.

Тщательность изготовления трансформаторов во многом определяет качество трансформаторного моста. Для упрощения схемы один из трансформаторов часто делают лишь с одной секцией, а витки двух секций другого трансформатора наматывают согласно. Схема моста при этом имеет вид, показанный на рис. 76. Там же показан подстроечный конденсатор $C_п$, при помощи которого производят начальную установку нуля на самом чувствительном диапазоне. Этот конденсатор необходим, во-первых, потому, что входные (измерительные) зажимы и соединительные провода имеют некоторую паразитную емкость. Во-вторых, у образцового конденсатора есть начальная емкость. Все это приводит к тому, что на чувствительной шкале прибор дает некоторые ложные показания, причем направление отклонения стрелки индикатора зависит от того, какая из емкостей больше — паразитная емкость входа или начальная у образцового конденсатора. При помощи подстроечного конденсатора действие результирующей емкости и компенсируют. Это дает возможность измерять очень малые емкости при сравнительно длинных соединительных проводниках.

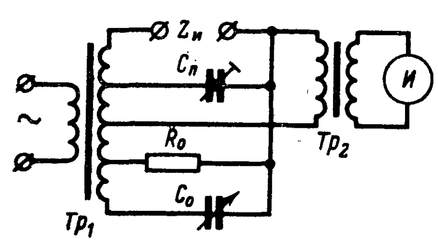


Рис. 76. Схема моста с односекционным трансформатором тока.

При помощи трансформаторного моста можно выполнять измерение элементов какой-либо схемы без их отпайки. Ведь всякая цепь может быть представлена в виде трехполюсника, и измерительная схема в этом случае будет выглядеть так, как это изображено на рис. 77. Нейтральная линия моста примет тот потенциал, который имеет точка *B* в измеряемом устройстве (мост не заземлен). Из этой

схемы нетрудно видеть, что будет измерено сопротивление $Z_и$, а сопротивления $Z_{вх}$ и $Z_{вых}$ почти не окажут влияния на результат, потому что их значения больше сопротивлений трансформаторов.

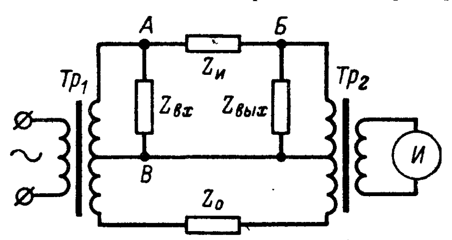


Рис. 77. Схема трансформаторного моста для измерения трехполюсников.

Индикаторный прибор трансформаторного моста может быть включен в выходную обмотку трансформатора тока непосредственно или через усилитель. Приведенное к первичной обмотке трансформатора тока сопротивление индикатора должно быть во много раз (в сто или более) меньше наименьшего измеряемого активного или реактивного (но не полного) сопротивления, т. е. $(n_1/n_2)^2R \leqslant 0{,}01R_{и.\,мин}$ или $(n_1/n_2)^2R \leqslant 0{,}01X_{и.\,мин}$, где R — сопротивление индикатора или входное сопротивление усилителя. Если порог чувствительности индикатора ΔI_2, то приведенный к входу трансформатора тока он равен $(n_1/n_2)\,\Delta I_2$. Эта величина должна быть больше изменения тока $\Delta I_и$, вызываемого таким отклонением измеряемого сопротивления от его номинального значения, которое равно допустимой погрешности измерения, т. е. $(n_1/n_2)\,\Delta I_2 \geqslant U_и\,(\Delta Z/Z^2)$. Желательно, чтобы индикаторный прибор был с нулем посредине шкалы.

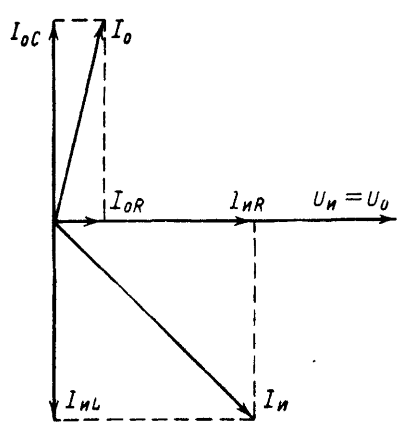


Рис. 78. Векторная диаграмма моста, поясняющая возможность применения меры емкости при измерении индуктивности.

Вернемся к схеме на рис. 72. Мы говорили, что если измеряемое и образцовое сопротивления однородны, то витки секции одного из трансформаторов, например трансформатора напряжений, должны быть намотаны встречно. При измерении активных сопротивлений и емкостей дело обстоит просто, потому что в качестве образцовой емкости с переменным значением можно использовать конденсатор настройки. Но изготовить образцовую индуктивность с переменным значением трудно. Поэтому стремятся обойтись без мер индуктивно-

сти. Если включить секции трансформаторов согласно, то для измерения индуктивности потребуется именно мера емкости, потому что при этом реактивные составляющие токов ветвей моста будут вычитаться в трансформаторе тока.

Для иллюстрации этого на рис. 78 изображена векторная диаграмма, имеющая место при измерении индуктивности. Ток в измерительной ветви отстает от напряжения в ней на угол, тангенс которого равен $R_и/\omega L_и$ (при параллельной схеме замещения катушки). Этот ток имеет две составляющих: активную $I_{и\,R}$, находящуюся в фазе с напряжением, и реактивную $I_{и\,L}$, отстающую от него на 90°. Ток в ветви сравнения опережает напряжение U_0 (которое при согласном включении секций трансформатора совпадает с напряжением $U_и$) на угол, тангенс которого равен $\omega R_0 C_0$ (параллельная схема). Этот ток также имеет активную и реактивную составляющие. Из диаграммы видно, что реактивные составляющие находятся в противофазе и могут быть уравновешены изменением емкости образцового конденсатора.

Активные составляющие токов протекают через первичную обмотку трансформатора тока в фазе и, следовательно, суммируются. Само по себе это не является препятствием к измерению индуктивности, потому что уравновешивание моста по реактивным токам определяется минимальными показаниями индикатора. Но следует указать, что, хотя уравновешивание трансформаторного моста и производится раздельно, чувствительность его по одному из параметров становится наибольшей тогда, когда другой параметр хотя бы приблизительно уравновешен.

В рассматриваемом случае составляющая $I_{0\,R}$ может быть сделана незначительной и даже равной нулю путем отключения образцового резистора. Активная же составляющая тока $I_{и\,R}$ в измерительной ветви при измерении катушек индуктивности в Q раз (Q — добротность катушки) меньше реактивной составляющей. Отсюда видно, что трансформаторный мост с мерой емкости пригоден для измерения индуктивностей (добротностью не ниже 10) при условии переключения концов одной из секций вторичной обмотки трансформатора напряжения. Но о сопротивлении катушки можно судить лишь приближенно. После уравновешивания реактивных токов индикатор будет показывать только активную составляющую тока через катушку, и если индикатор градуирован в единицах напряжения, то можно оценить и сопротивление катушки, так как напряжение U_0 известно.

На рис. 79 приведена принципиальная схема трансформаторного моста для измерения емкостей и сопротивлений. Этот прибор рассчитан на пять пределов измерения емкости: до 10, до 100, до 1 000 *пф*, до 0,01 и до 0,1 *мкф*. В качестве образцового использован двухсекционный прямочастотный конденсатор настройки, секции которого включены параллельно. Шкала емкостей нелинейна. Она растянута в начальной части и сжата в конце. Это дает возможность измерять на первой шкале десятые доли пикофарады.

Образцовый резистор R_1 соединен с движком потенциометра R_2, подключенного к обмотке *IV* трансформатора тока $Тр_2$. При таком включении конечная отметка шкалы соответствует бесконечно большому сопротивлению, а первая ее отметка начальному сопротивлению, что удобно при измерении сопротивления утечки конденсато-

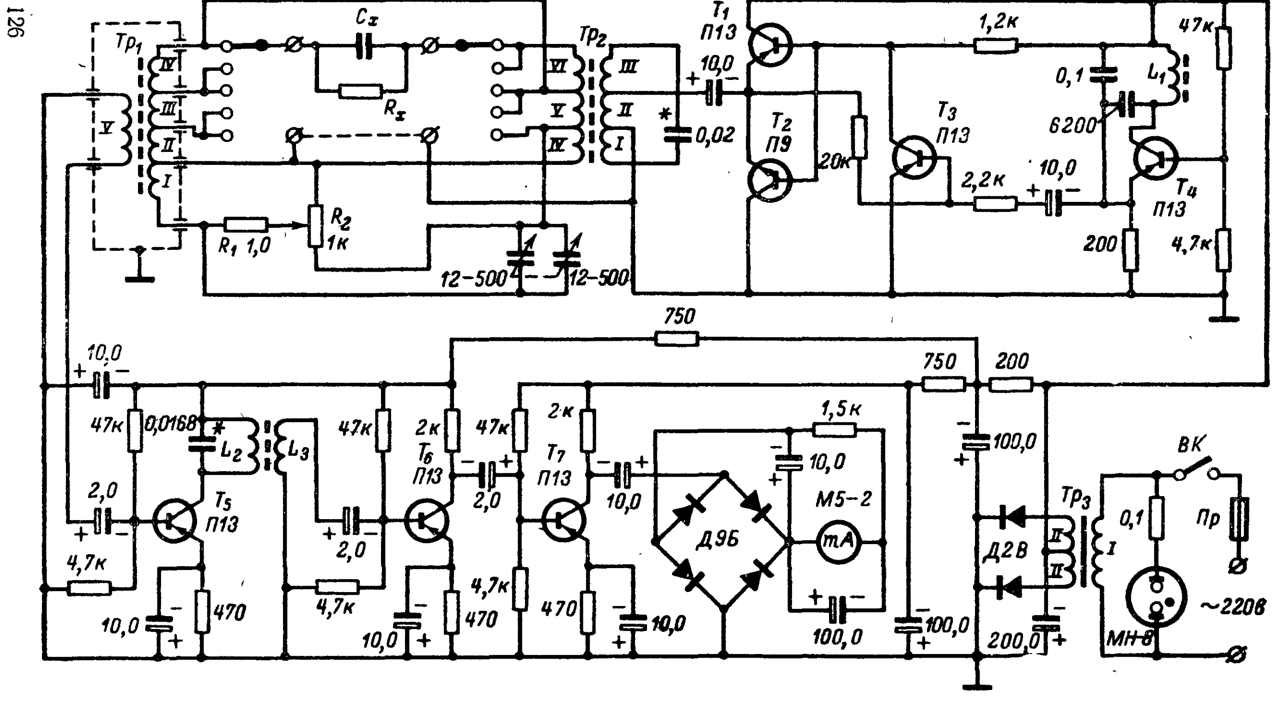


Рис. 79. Схема трансформаторного моста для измерения емкостей и сопротивлений.

ров. Прибор позволяет измерять сопротивления резисторов в пределах от 1 *ком* до 1 *Гом* на шкалах от 1, от 10, от 100 *ком*, от 1 и от 10 *Мом*.

Погрешность при измерении емкости относительно ее номинального значения составляет около 1% во второй половине шкалы и около 3% в первой. Чтобы получить такую высокую точность, были очень тщательно намотаны трансформаторы $Тр_1$ и $Тр_2$, сведен к минимуму люфт в механических передачах отсчетных механизмов и градуировка проведена по образцовому воздушному конденсатору типа Р534. Заметим, что погрешность, не превышающую 3%, можно

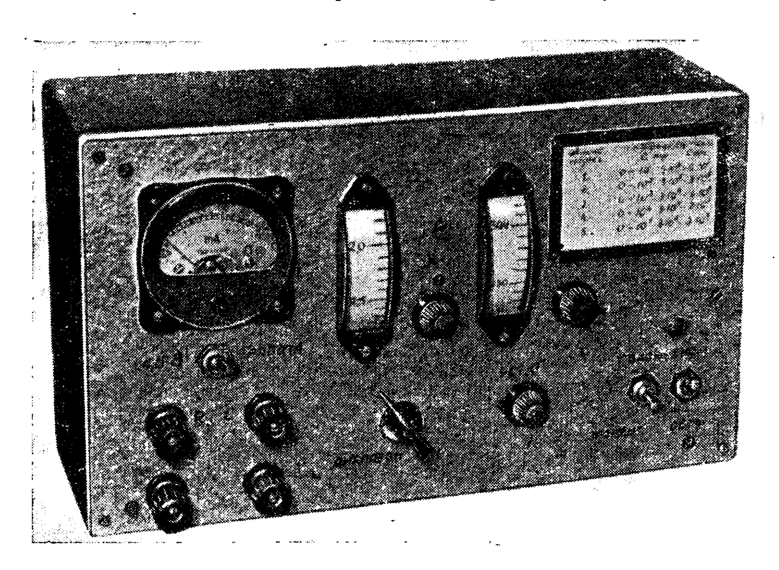


Рис. 80. Внешний вид трансформаторного моста для измерения емкостей и сопротивлений.

получить без особых затруднений. Погрешность при измерении активных сопротивлений изменяется от 1% относительно номинального значения сопротивления в начале шкалы до 8% в конце ее рабочей части. В значительной части это погрешность отсчета.

Генератор (частота 15,9 *кгц*) собран на транзисторе $Т_4$ по трехточечной схеме с емкостной обратной связью. Напряжение генератора усиливается транзисторами $Т_1$ — $Т_3$ и поступает затем на первичную обмотку трансформатора напряжения $Тр_2$. Вторичная обмотка трансформатора тока $Тр_1$ подключена к входу усилителя, собранного на транзисторах $Т_5$ — $Т_7$. В коллекторной цепи транзистора $Т_5$ включен колебательный контур, настроенный на частоту генератора. Транзистор $Т_7$ нагружен на двухполупериодный мостовой выпрямитель с диодами Д9Б, на выходе которого включен индикаторный прибор (миллиамперметр М5-2). Мост питается от электросети напряжением 220 *в* через выпрямитель, собранный на дио-

дах Д2В (его можно питать и от батарей или аккумулятора напряжением 12 *в*).

Трансформаторы тока Tp_1 и напряжения Tp_2 с обмотками из провода ПЭВ-2 собраны в броневых ферритовых (МФ-2000) сердечниках с наружным диаметром 32 *мм*. Обмотка *I* трансформатора Tp_1 состоит из 1100 витков провода диаметром 0,08 *мм*, обмотка *II* — из 10 витков провода 0,25 *мм*, обмотка *III* — из 90 витков провода 0,14 *мм*, обмотка *IV* — из 900 витков провода 0,1 *мм* и обмотка *V* — из 250 витков провода 0,14 *мм*. Обмотка *I* трансформатора Tp_2 состоит из 50 витков провода диаметром 0,14 *мм*, обмотка *II* — из 20 витков и обмотка *III* — из 30 витков такого же провода, обмотка *IV* — из 10 витков провода 0,25 *мм*, обмотка *V* — из 90 витков провода 0,14 *мм* и обмотка *VI* — из 900 витков провода 0,1 *мм*. Катушки L_1, L_2 и L_3 намотаны на тороидальном сердечнике из феррита М-1000 с наружным диаметром 10 *мм* проводом ПЭВ-2 0,14. Катушка L_1 состоит из 150, катушка L_2 — из 100 и катушка L_3 — из 20 витков. Трансформатор питания Tp_3 собран на сердечнике из пластин трансформаторной стали Ш-10, набор 33 *мм*. Сетевая его обмотка *I* состоит из 2200 витков провода ПЭВ-2 0,12, а обмотка *II* — из 2×150 витков провода ПЭВ-2 0,2.

Внешний вид моста показан на рис. 80.

25. Измерение взаимоиндуктивности и собственной емкости катушек

Взаимоиндуктивность *M* двух катушек можно определить методом двукратного измерения индуктивности. Включим сначала катушки L_1 и L_2 последовательно и согласно (рис. 81, *а*) и измерим их

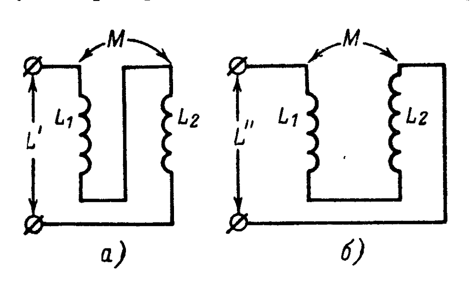


Рис. 81. Определение взаимоиндуктивности методом двукратного измерения индуктивности катушек.

а — последовательное согласное включение катушек; *б* — последовательное встречное включение катушек.

суммарную индуктивность $L' = L_1 + L_2 + 2M$. Затем пересоединим эти катушки последовательно и встречно (рис. 81, *б*) и вновь измерим их суммарную индуктивность $L'' = L_1 + L_2 - 2M$. Вычитая из первого уравнения второе, найдем:

$$M = \frac{L' - L''}{4}.$$

Взаимоиндуктивность можно определить также методом вольтметра-амперметра (рис. 82). Подключим через миллиамперметр *mA* одну из катушек, например катушку L_1, к источнику переменного напряжения известной частоты *f* (обычно это звуковой генератор),

а другую катушку — L_2 к электронному вольтметру V. Взаимоиндуктивность рассчитывается по измеренным действующим значениям тока I_1 через катушку L_1 и напряжения U_2 на катушке L_2

$$M = \frac{U_2}{2\pi f I_1}.$$

При расчете и настройке полосовых фильтров обычно оперируют коэффициентом связи k двух катушек L_1 и L_2, под которыми понимают отношение взаимоиндуктивности M этих катушек к максимально возможному его значению $\sqrt{L_1L_2}$, т. е. $k = M/\sqrt{L_1L_2}$. Коэффициент связи можно довольно просто определить при помощи гете-

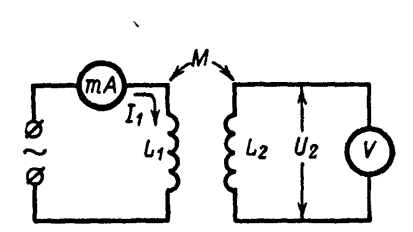


Рис. 82. Определение взаимоиндуктивности катушек методом вольтметра-амперметра.

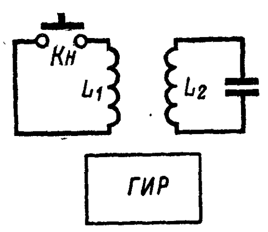


Рис. 83. Определение коэффициента связи катушек при помощи гетеродинного индикатора резонанса.

родинного индикатора резонанса (или куметра). Сначала гетеродинным индикатором резонанса *ГИР* измеряют резонансную частоту f_1 контура при разомкнутых, а затем его частоту f_2 при замкнутых контактах кнопки *Кн* (рис. 83). При этом коэффициент связи

$$k = \sqrt{1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}}.$$

Переходное сопротивление контактов кнопки в замкнутом положении должно быть незначительным. Можно обойтись и без кнопки, если при измерении частоты f_2 замкнуть накоротко концы катушки L_1.

Рассмотренные методы измерения взаимоиндуктивности дают значительные погрешности. Более точные измерения могут быть выполнены при помощи мостов переменного тока частотой в несколько килогерц. Схема одного из таких мостов показана на рис. 84. Катушка L_1 здесь включена в первое плечо моста, а связанная с ней катушка L_2 в диагональ индикатора равновесия *И*. Мост уравновешивается при условии

$$M = R_1R_3C \quad \text{или} \quad M = \frac{R_3}{R_3 + R_4} L_1.$$

Этот мост, как и другие мосты подобного рода, имеет тот недостаток, что для измерения взаимоиндуктивности нужно предварительно измерить индуктивность катушки L_1 или ее активное сопротивление R_1, включая и сопротивление потерь. Для этого нужен

либо второй мост, либо соответствующая коммутация цепей данного моста. Значительно лучшие результаты измерения получаются с мостом, в котором измеряемая взаимоиндуктивность M_x уравновешивается образцовой взаимоиндуктивностью M_0, т. е. при $M_x = M_0$ (рис. 85).

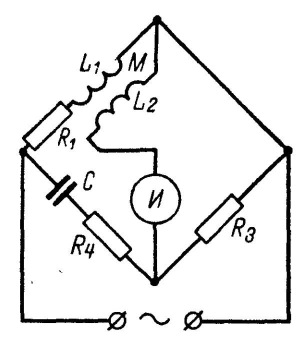


Рис. 84. Схема моста для измерения взаимоиндуктивностей.

Наличие потерь в катушках делает необходимым уравновешивание актив-

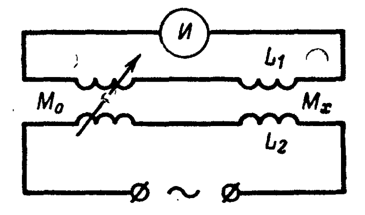


Рис. 85. Схема моста с образцовой взаимоиндуктивностью.

ной составляющей напряжения в цепи индикатора посредством включения в схему образцового резистора R_0, а для расширения пределов измерения катушки L_1 и L_2 включают через трансформаторы с отводами (рис. 86).

Образцовую взаимоиндуктивность M_0 с переменным значением можно заменить автотрансформатором AT с отводами (рис. 87). Зна-

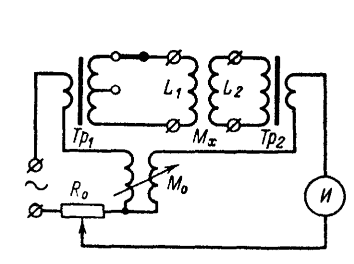


Рис. 86. Схема трансформаторного моста.

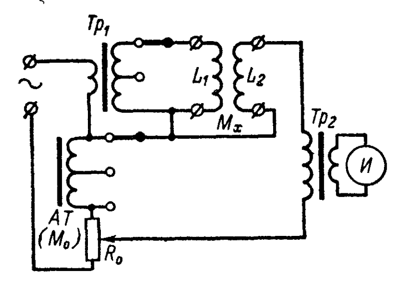


Рис. 87. Схема моста с автотрансформатором, заменяющим образцовую взаимоиндуктивность.

чение взаимоиндуктивности в этом случае можно изменять только ступенями. Однако величину наименьшей ступени нетрудно сделать достаточно малой.

На рис. 88 показана схема моста с автотрансформатором и автотрансформаторами, поясняющая метод повышения точности отсчета при измерении взаимоиндуктивности. Эта схема дает возможность переключать образцовую взаимоиндуктивность ступенями через $^1/_8$ часть от ее максимального значения. Если сделать у автотранс-

форматора AT и трансформаторов $Тр_3$ и $Тр_4$ не по две, а по десять секций, то наименьшая ступень будет равна тысячной доле максимального значения образцовой взаимоиндуктивности, т. е. погрешность отсчета составит 0,1%. При намотке автотрансформатора на тороидальном ферритовом сердечнике максимальное значение взаимоиндуктивности равно индуктивности автотрансформатора. Порог чувствительности индикатора *И* должен быть достаточно низок для того, чтобы различать переключение значения образцовой взаимоиндуктивности на величину наименьшей ступени.

Такой мост пригоден для измерения не только взаимоиндуктивностей, но также индуктивностей и малых сопротивлений. При измерении взаимоиндуктивности катушку L_1 подключают к зажимам *1* и *2*, а катушку L_2 к зажимам *3* и *4*. При измерении же индуктивно-

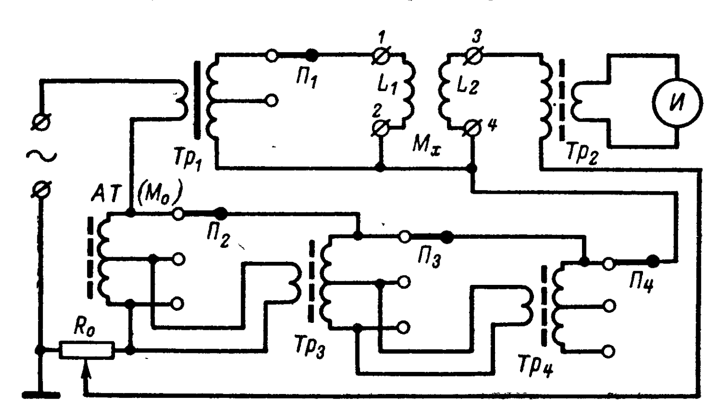


Рис. 88. Схема моста для измерения взаимоиндуктивности, поясняющая метод повышения точности отсчета.

стей и сопротивлений зажимы *1* и *3* замыкают накоротко и измеряемую деталь подключают одним ее концом к зажиму *1* или *3*, а другим концом к зажиму *2* или *4*.

На рис. 89 приведена полная схема прибора для измерения взаимоиндуктивностей, индуктивностей и сопротивлений. Пределы измерения взаимоиндуктивности и индуктивности от 0,05 *мкгн* до 10 *мгн* перекрываются четырьмя поддиапазонами: до 10, до 100 *мкгн*, до 1 и до 10 *мгн*. Сопротивления от 0,1 *ом* до 2 *ком* измеряются на шкалах до 2, до 20, до 200 *ом* и до 2 *ком*.

Генератор прибора выполнен на транзисторе $Т_3$ по трехточечной схеме с емкостной обратной связью. Его частота 15,9 *кгц*. С измерительной схемой моста он связан через однокаскадный буферный усилитель на транзисторе $Т_2$. Трехкаскадный усилитель индикатора равновесия собран на транзисторах $Т_4$ — $Т_6$. Его чувствительность благодаря диодам Д101 и Д7В зависит от амплитуды входного напряжения (при небольшом напряжении она наибольшая, а с его ростом уменьшается по приблизительно логарифмическому закону).

Трансформатор $Тр_1$ собран на сердечнике из пластин трансформаторной стали Ш-16, набор 16 *мм*. Его обмотка состоит из 1 000 вит-

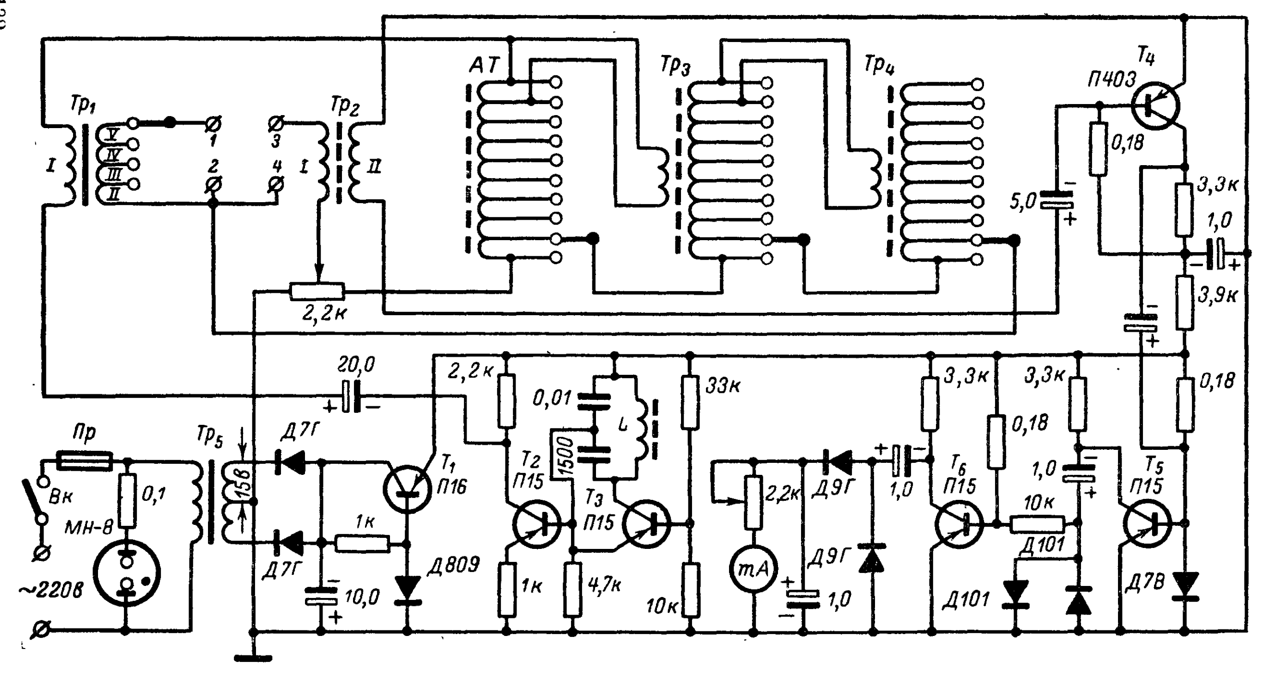


Рис. 89. Полная схема моста для измерения взаимоиндуктивности, индуктивности и сопротивлений.

ков провода ПЭВ 0,1, обмотка *II* — из 31,5 витков ПЭВ 0,21, обмотка *III* — из 68,5 витков ПЭВ 0,15, обмотка *IV* — из 216 витков ПЭВ 0,12 и обмотка *V* — из 684 витков ПЭВ 0,1. Трансформаторы $Тр_2$, $Тр_3$, $Тр_4$ и автотрансформатор *АТ* намотаны на ферритовых (М-2000) тороидальных сердечниках наружным диаметром 17 *мм* и сечением 5×5 *мм*. Обмотки связи у трансформаторов $Тр_3$ и $Тр_4$ содержат по 30 витков, а обмотки из 9 секций по 3 витка (в каждой секции) провода ПЭВ 0,45. Автотрансформатор *АТ* имеет 9 секций по 10 витков (всего 90 витков) провода ПЭВ 0,15. Обмотка *I* выходного трансформатора $Тр_2$ состоит из 200 витков, а обмотка *II* — из 100 витков провода ПЭВ 0,15.

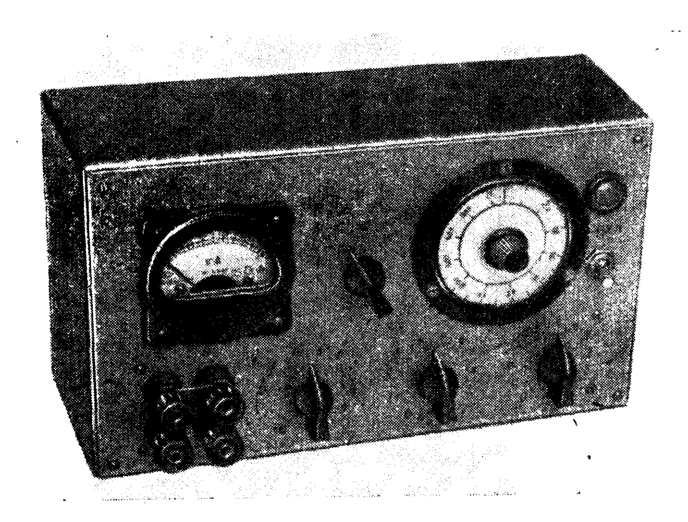


Рис. 90. Внешний вид моста для измерения взаимоиндуктивностей, индуктивностей и сопротивлений.

Внешний вид прибора показан на рис. 90.

Всякая катушка имеет распределенную емкость, так как при работе катушки потенциалы ее витков различны. В упрощенном виде катушку представляют в виде параллельного соединения индуктивности катушки $L_к$ и сосредоточенной собственной емкости катушки $C_к$. Последняя определяет собственную резонансную частоту катушки.

Непосредственно измерять значение $C_к$ нельзя, поэтому для ее измерения прибегают к следующему косвенному методу. Сначала параллельно катушке подключают конденсатор емкостью C_1 и при помощи гетеродинного индикатора находят резонансную частоту параллельного контура

$$f_1 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_к (C_1 + C_к)}}.$$

Затем вместо конденсатора C_1 подключают к катушке другой кон-

денсатор емкостью C_2 и находят резонансную частоту контура для этого случая

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_к (C_2 + C_к)}}.$$

Отсюда собственная емкость катушки

$$C_к = \frac{f_2^2 C_2 - f_1^2 C_1}{f_1^2 - f_2^2}.$$

При этом отпадает надобность в измерении $L_к$. Одна из емкостей (C_1 или C_2) должна быть примерно одного порядка с емкостью $C_к$. Значения C_1 и C_2 нужно знать достаточно точно, поэтому лучше всего применять образцовые конденсаторы.

26. Резонансные приборы

В резонансных приборах используют зависимость резонансной частоты колебательного контура от его индуктивности и емкости

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \tag{11}$$

Измерения выполняются на радиочастотах, так как на низких частотах резонанс проявляется менее резко и установить момент его наступления без большой погрешности нельзя. Следовательно, резонансными приборами измеряют такие индуктивности и емкости, которые имеют место в колебательных контурах высокой частоты радиоустройств.

Из формулы для резонансной частоты контура видно, что за меру емкости или индуктивности (они входят в формулу симметрично) можно принять либо значение $f_{рез}$ контура, составленного из измеряемой емкости (или индуктивности) и образцовой индуктивности (или емкости), либо изменение емкости (или индуктивности) колебательного контура, необходимое для сохранения фиксированной величины $f_{рез}$ после подключения измеряемой емкости или индуктивности, либо расстройку контура. Рассмотрим эти три метода по порядку.

1. В простейшем случае измеряемую катушку индуктивности можно включить параллельно образцовому конденсатору и измерить резонансную частоту контура при помощи гетеродинного индикатора резонанса. Индуктивность катушки затем рассчитывается по формуле (11). Так же можно поступить и при измерении емкости, включив измеряемый конденсатор параллельно образцовой катушке. Точность измерения, определяемая при этом в основном точностью измерения резонансной частоты гетеродинным индикатором, не может быть высокой.

Легко видеть, что если использовать для измерений одну и ту же сменную катушку гетеродинного индикатора, т. е. один и тот же частотный диапазон, то шкала индикатора может быть проградуирована в значениях индуктивности и емкости. Таким образом, на шкалу можно заранее нанести результаты расчетов по формуле (11), так как связь между индуктивностью контура гетеродинного инди-

катора резонанса, углом поворота ротора его конденсатора и частотой колебаний известна.

Пусть измерительный контур состоит из образцового конденсатора емкостью C_0 и измеряемой катушки с неизвестной индуктивностью L_x (рис. 91). Настроим гетеродинный индикатор резонанса *ГИР* в резонанс с измерительным контуром (связь должна быть слабой). При равенстве частот двух контуров равны и произведения их индуктивностей и емкостей

$$L\,(C_{\text{н}} + C) = L_x C_0, \tag{12}$$

где L — индуктивность катушки контура гетеродинного индикатора;

$C_{\text{н}}$ — начальная емкость контура индикатора;

C — емкость (переменная) конденсатора настройки.

Отсюда

$$L_x = \frac{L}{C_0}\,(C_{\text{н}} + C).$$

Все величины правой части этого выражения известны. Более того, шкала гетеродинного индикатора резонанса может быть проградуирована в единицах индуктивности и расчетным путем (ведь она градуирована по частоте). Из формулы (12) видно, что

$$L\,(C_{\text{н}} + C) = \frac{1}{4\pi f^2}.$$

Отсюда, зная емкость C_0 (а мы ее должны знать с высокой точностью), для каждой частотной отметки шкалы можно рассчитать соответствующее ей значение L_x.

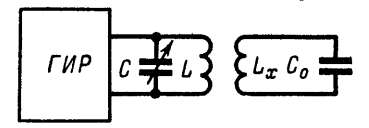


Рис. 91. Схема резонансного измерения индуктивности катушки.

При измерении емкости с помощью образцовой катушки индуктивностью L_0 (собственную емкость ее мы не учитываем) измеряемая емкость

$$C_x = \frac{L}{L_0}\,(C_{\text{н}} - C).$$

Пределы измерения можно менять переключением отношения L/C_0 для индуктивностей и L/L_0 для емкостей в основном за счет C_0 и L_0, хотя в принципе можно менять и диапазонную катушку гетеродинного индикатора резонанса. Но замена катушки неудобна во многих отношениях, и поэтому стараются проводить измерения на одном диапазоне частот.

Наименьшее значение измеряемой индуктивности $L_{x\,\text{мин}} = C_{\text{н}}\,(L_0/C_0)$ ограничивается в основном неточным определением резонансной частоты вследствие низкой добротности контура при большой емкости C_0. Поэтому частотный диапазон выбирают, исходя из достаточной добротности контура при наименьшей индуктивности, которую предполагается измерять.

Индуктивность катушек невысокой добротности гетеродинным индикатором резонанса нельзя измерить точно, и не только из-за тупого резонанса, но и из-за явления захватывания, которое имеет

место при сильной связи, необходимой при больших потерях в измерительном контуре. Но в любительских условиях измерения гетеродинным индикатором очень удобны.

В промышленном приборе типа Е12-1 (ИИЕВ-1) указанные недостатки устранены путем усложнения схемы (рис. 92). В нем измерительный контур представляет собой колебательный контур генератора высокой частоты. Равенство частот колебаний этого генератора и стабильного диапазонного генератора определяется по методу биений. Для этого колебания от обоих генераторов подаются на смеситель. Разностная частота выделяется фильтром нижних частот и после усиления поступает на индикатор. Равенству частот генераторов соответствуют нулевые биения. Для устранения затягивания частоты генераторов между ними и смесителем включены буферные усилители.

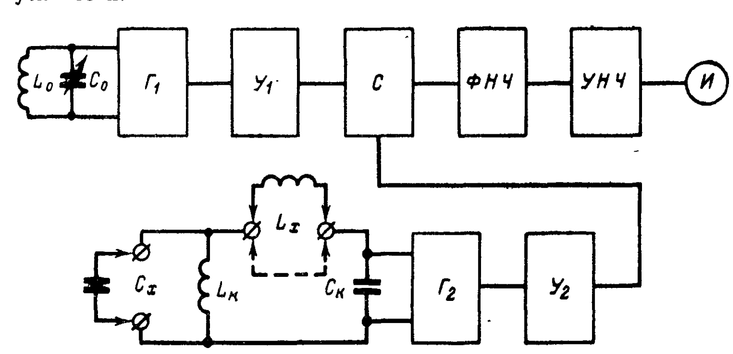


Рис. 92. Блок-схема измерительного прибора Е12-1.

$Г_1$ — диапазонный генератор; $Г_2$ — измерительный генератор; $У_1$ и $У_2$ — буферные усилители; *С* — смеситель; *ФНЧ* — фильтр низких частот; *УНЧ* — усилитель низкой частоты; *И* — индикатор.

В колебательный контур диапазонного генератора включен образцовый конденсатор переменной емкости C_0. Измеряемая катушка L_x включается в измерительный контур второго генератора последовательно с катушкой контура $L_к$, а измеряемый конденсатор — параллельно контуру при замкнутых накоротко зажимах L_x. Перед началом измерений зажимы L_x замыкают накоротко и генераторы настраивают на одинаковую частоту по нулевым биениям при минимальной образцовой емкости C_0 контура диапазонного генератора. Затем, подключив катушку L_x или конденсатор C_x, этот контур настраивают образцовым конденсатором в резонанс с контуром $L_к C_к$. Лимб образцового конденсатора градуирован в микрогенри и микрофарадах.

Для измерения емкости от 1 до 10 *пф* предусмотрен конденсатор, емкость которого можно изменять в пределах не менее 10 *пф*. Измерение емкости от 10 до 5000 *пф* осуществляется при помощи четырех образцовых конденсаторов постоянной емкости и конденсатора, изменяющего свою емкость в пределах не менее 1000 *пф*. Изменение поддиапазона производится переключением контурных катушек (неработающие катушки замыкаются накоротко).

Прибор Е12-1 имеет следующие технические характеристики. Пределы измерения индуктивностей от 0,05 *мкгн* до 100 *мгн* разделены на пять поддиапазонов: 0,05—10 *мкгн* (частота от 1,55 до 1,1 *Мгц*); 10—100 *мкгн* (частота от 50 до 355 *кгц*); 100—1000 *мкгн* (частота от 155 до 110 *кгц*); 1—10 *мгн* (частота от 50,5 до 35,5 *кгц*); 10—100 *мгн* (частота от 15,5 до 11 *кгц*). Пределы измерения емкостей — от 1 до 5000 *пф* (частота от 700 до 300 *кгц*). Основная погрешность прибора при измерении индуктивности не превышает ± 1,5% от измеряемой величины и ± 0,2% от номинального значения шкалы соответствующего диапазона, начиная с индуктивности 0,5 *мкгн*. Погреш-

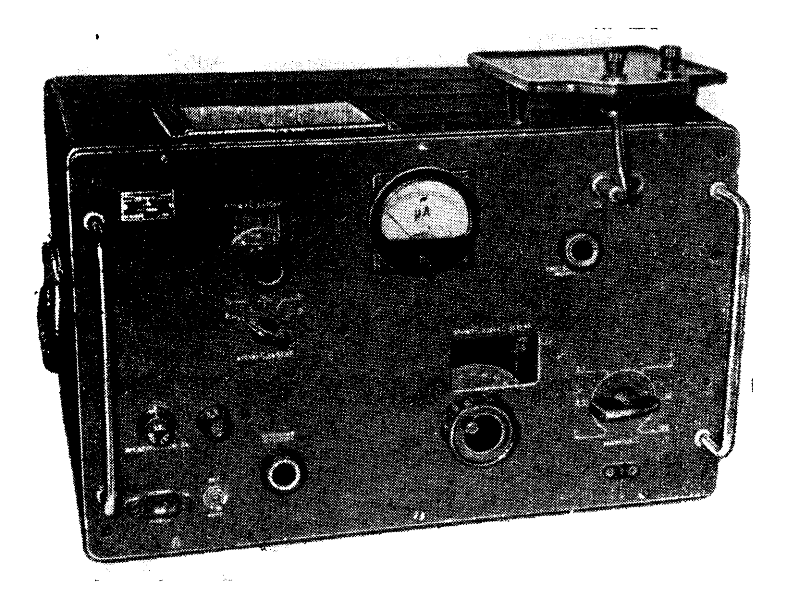


Рис. 93. Внешний вид прибора Е12-1.

ность измерения емкости от 1 до 10 *пф* составляет ± 5% ± 0,05 *пф*, а в остальном диапазоне ± 0,5% ± 0,4 *пф*. Дополнительная погрешность измерения индуктивности из-за влияния собственной емкости катушки и ее добротности определяется по прилагаемым к прибору графикам. Внешний вид прибора Е12-1 показан на рис. 93.

Вернемся к схеме на рис. 91. Момент совпадения настройки контуров можно отметить, очевидно, также по максимуму напряжения на самом измерительном контуре. Схема простейшего прибора такого типа показана на рис. 94. Прибор собран на двойном триоде типа 6Н3П и позволяет измерять индуктивности от 0,2 *мкгн* и до 20 *мгн* с погрешностью 2%, а также емкости (по методу замещения, о котором мы расскажем ниже).

Генератор собран на правом триоде по схеме с автотрансформаторной обратной связью. С конденсатором настройки, емкость кото-

рого изменяется от 15 до 550 *пф*, при положениях *1*, *2*, *3*, *4* и *5* переключателя $П_2$ диапазоны измерения составляют соответственно 0,2—2 *мкгн*, 2—20 *мкгн*, 20—200 *мкгн*, 0,2—2 *мгн* и 2—20 *мгн*. У катушек L_1, L_2 и L_3 в катодную цепь триода подключается третья, а у катушек L_4 и L_5 четвертая часть их витков. Генератор связан с измерительным контуром через конденсатор C_1.

Измеряемая катушка при положении *2* переключателя $П_1$ подключается параллельно образцовому конденсатору C_0. Большой образцовая емкость (4000 *пф*) берется для того, чтобы собственная емкость измеряемой катушки не оказывала влияния на измерения. При измерении емкости переключатель $П_1$ переводится в положение *1*.

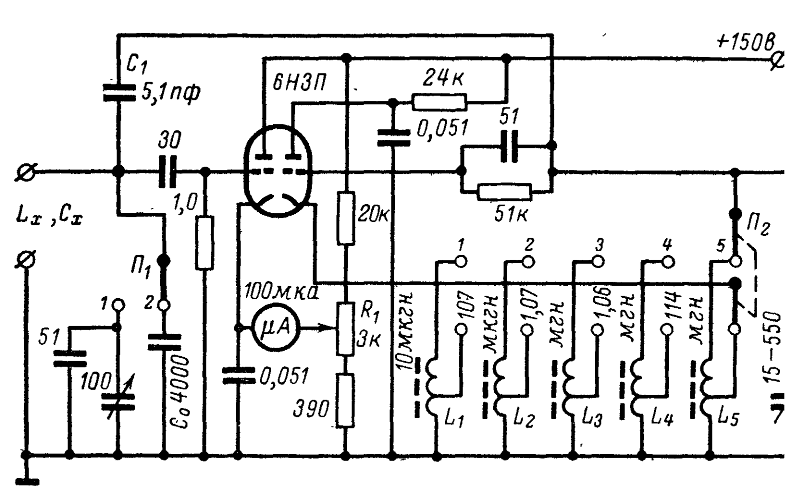


Рис. 94. Схема прибора для измерения индуктивности с индикацией резонанса на измерительном контуре.

Колебания с измерительного контура поступают на индикатор резонанса, представляющий собой собранный на левом (по схеме) триоде катодный детектор с микроамперметром на выходе. Чувствительность индикатора регулируют потенциометром R_1. Постоянная составляющая напряжения на катоде этого триода лишь немного меньше амплитуды колебаний на контуре. Поэтому нагрузка на контур получается минимальной.

В рассмотренных приборах частота измерительного контура в процессе измерения остается постоянной, а настраивается контур диапазонного генератора при помощи образцового конденсатора переменной емкости до совпадения их резонансных частот. Этот способ можно обратить, т. е. изменять частоту измерительного контура до совпадения ее с фиксированной частотой генератора. Преимущество такого способа заключается в том, что стабильность генератора, работающего на фиксированной частоте, выше, чем диапазонного.

На рис. 95 приведена схема резонансного прибора для измерения индуктивности с генератором фиксированных частот. Генератор, выполненный на пентоде 6Ж1П, работает на пяти фиксированных частотах. Напряжение с него подается на измерительный контур через конденсатор связи C_1 и измеряется на этом контуре ламповым вольтметром, собранным на двойном триоде 6Н1П с микроамперметром на выходе в качестве индикатора. Чувствительность индикатора регулируется резистором R_2, а нулевая точка устанав-

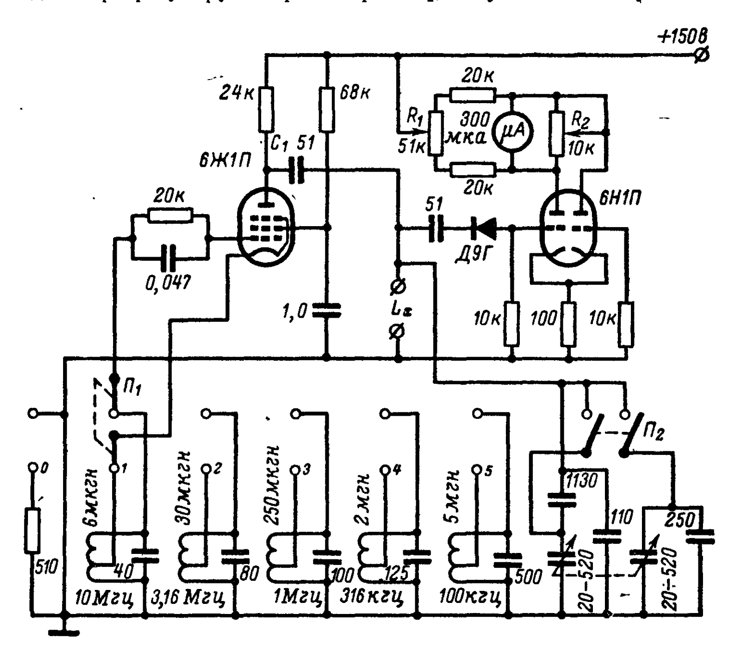


Рис. 95. Схема резонансного прибора для измерения индуктивности с генераторами фиксированных частот.

ливается потенциометром R_1. Переход с одного диапазона измерения на другие диапазоны осуществляется переключением частот генератора при помощи переключателя $П_1$.

Поскольку индуктивность обратна квадрату частоты, т. е. $L_x = 1/4\pi f^2 C$, был выбран такой ряд частот, который обеспечивает кратность диапазонов измерения, равную 10. В свою очередь диапазоны делятся на два поддиапазона в отношении 1 : 3,5 путем переключения конденсаторов измерительного контура переключателем $П_2$. Положениям *1*, *2*, *3*, *4* и *5* переключателя $П_1$ при разомкнутом переключателе $П_2$ соответствуют диапазоны измерения 0,54—1,95 *мкгн*, 5,4—19,5 *мкгн*, 54—195 *мкгн*, 0,54—1,95 *мгн* и 5,4—19,5 *мгн*, а при замкнутом переключателе $П_2$ соответственно 0,18—0,63 *мкгн*, 1,8—6,3 *мкгн*, 18—63 *мкгн*, 180—630 *мкгн* и 1,8—6,3 *мгн*.

Катушки генератора и генератор в целом должны быть надежно экранированы, а в цепь накала генераторной лампы нужно включить высокочастотные дроссели. Несмотря на небольшое отношение измеряемой индуктивности к емкости измерительного контура при измерении малых индуктивностей, чувствительность прибора остается высокой (при подключении, например, провода длиной 30 *см* и индуктивностью около 0,3 *мкгн* стрелка индикатора отклоняется при резонансе на всю шкалу). Собственную индуктивность входа (при замкнутых накоротко входных зажимах) можно определить при помощи другого прибора. Это позволит в дальнейшем вводить поправки при измерении малых индуктивностей.

2. Во многих резонансных приборах измерение емкости производится методом замещения. Обратимся вновь к схеме на рис. 91 и условимся, что вначале измерительный контур состоит из образцовой катушки индуктивности и образцового конденсатора переменной емкости, установленного на наибольшую емкость. Настроив гетеродинный индикатор в резонанс с этим контуром, включим параллельно образцовому конденсатору измеряемую емкость C_x. Резонансная частота контура при этом уменьшится, и чтобы вернуть ее к прежнему значению, мы должны уменьшить емкость образцового конденсатора также на величину C_x. Если образцовый конденсатор снабжен лимбом, на котором нанесены значения емкости в зависимости от угла его поворота, то определим измеряемую емкость как разность двух отсчетов. Часть емкости образцового конденсатора, таким образом, оказывается замещенной равновеликой измеряемой емкостью. Гетеродинный индикатор или любой другой индикатор резонанса играет здесь роль нулевого указателя.

Очевидно, что в первую очередь метод замещения пригоден для измерения емкостей, а не индуктивностей, так как изготовить высокодобротную образцовую катушку с переменной индуктивностью затруднительно. Однако обычно приборы делают универсальными, сочетая различные методы измерения емкости и индуктивности.

На рис. 96 приведена схема прибора для измерения емкостей и индуктивностей, в котором совпадение частот контуров определяют при помощи фазового дискриминатора. Этот прибор портативен и удобен в работе.

Генератор фиксированной частоты 1 *Мгц* прибора собран на транзисторе типа П401. Частота стабилизирована кварцем *Кв*. В коллекторную цепь транзистора включен дискриминатор с катушками L_2 и L_3, настроенный на частоту кварца. Через конденсатор C_4 с генератором связан измерительный контур. На резисторе R_3 происходит сравнение фазы колебаний в измерительном контуре с фазой колебаний генератора. Если измерительный контур настроен точно на частоту генератора, то напряжение на выходе дискриминатора равно нулю. Расстройка контура приводит к фазовому сдвигу колебаний в нем, и на выходе дискриминатора появляется постоянное напряжение, полярность которого зависит от того, является ли фазовый сдвиг емкостным или индуктивным. По полярности напряжения можно судить о том, велико или мало установленное значение емкости образцового конденсатора по сравнению с измеряемой емкостью.

В положении *1* переключателя *П* измеряют емкость до 500 *пф*. Измерительный контур в этом случае состоит из образцовой катушки индуктивности L_4, образцового конденсатора переменной емкости C_8

с параллельно включенным подстроечным конденсатором C_5 и измеряемой емкости C_x, подключаемой к входным зажимам прибора. Индуктивность катушки L_4 такова, что при отсутствии измеряемой емкости C_x и максимальной емкости конденсатора $C_в$, т. е. при полностью введенном роторе этого конденсатора, измерительный контур настроен на частоту 1 *Мгц*. Подключение измеряемой емкости C_x изменяет резонансную частоту контура и вызывает фазовый сдвиг между колебаниями генератора и контура, что приводит к появлению на выходе дискриминатора напряжения, регистрируемого стрелочным индикатором. Поворачивая ручку (ротор) конденсатора $C_в$, уменьшают его емкость до тех пор, пока контур

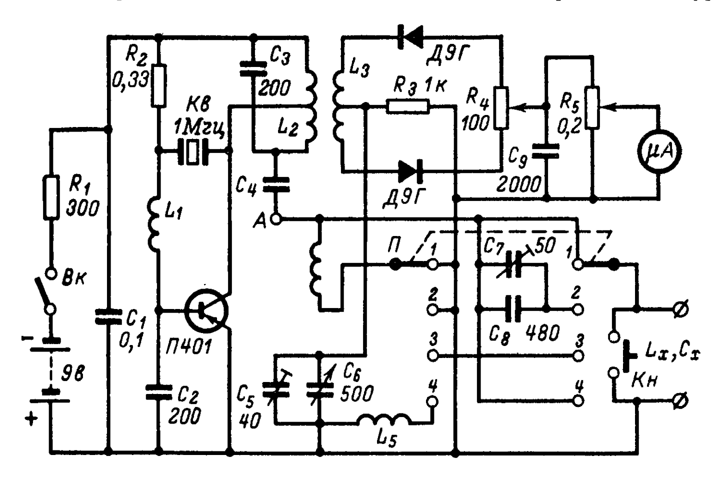


Рис. 96. Схема резонансного прибора для измерения емкости и индуктивности методом замещения.

вновь окажется настроенным в резонанс с генератором (этому соответствует уменьшение емкости конденсатора до значения измеряемой емкости C_x). Положение ротора конденсатора может быть проградуировано в единицах емкости. Очевидно, что наибольшая емкость, которую можно измерить таким способом, равна максимальной изменяемой емкости конденсатора $C_в$ (в данном случае 500 *пф*).

В положении *2* переключателя *П* последовательно с измеряемой емкостью C_x оказывается включенным конденсатор C_8 (вместе с подстроечным конденсатором C_7), что дает возможность измерять емкость от 400 *пф* до 0,03 *мф*. Измерения производят так. Вначале при нажатой кнопке *Кн* (измеряемая емкость замкнута накоротко) и минимальной емкости образцового конденсатора $C_в$ измерительный контур настраивают в резонанс с генератором. Затем при отпущенной кнопке увеличивают емкость образцового конденсатора (поворачивают его ручку) до тех пор, пока измерительный контур снова окажется настроенным в резонанс с генератором. Следует отметить, что шкала в этом случае получается более узкой, чем при измерении емкостей до 500 *пф* (ее начальный и конечный участки нерабочие).

В положении *3* переключателя *П* образцовая катушка индуктивности L_4 включается последовательно с измеряемой индуктивностью L_x. Вначале измерительный контур настраивают в резонанс с генератором при нажатой кнопке и максимальной емкости образцового конденсатора C_6, а затем, отпустив кнопку, снова настраивают измерительный контур в резонанс с генератором, уменьшая для этого емкость образцового конденсатора. Таким образом можно измерять индуктивность до 450 *мкгн*.

В положении *4* переключателя *П* к катушке L_4 добавляется катушка L_5, и измерительный контур настраивают в резонанс с генератором при минимальной емкости конденсатора C_6. Измеряемая катушка, подключенная параллельно контуру, уменьшает его индуктивность, и для восстановления резонанса емкость образцового конденсатора соответственно увеличивают. В этом положении переключателя измеряют индуктивности от 300 *мкгн* до 5 *мгн*.

Конденсатор C_5 служит для точной подстройки контура. Ручка его выводится на переднюю панель. При помощи этого конденсатора компенсируют также емкость проводов, соединяющих измеряемый конденсатор или катушку с зажимами прибора.

Потенциометр R_4 (непроволочный) используется при налаживании дискриминатора. Для этого отключают измерительный контур в точке *А*. Движок потенциометра устанавливают приблизительно в среднем положении, чувствительность индикатора уменьшают до нуля (потенциометром R_5) и включают питание генератора. Затем осторожно увеличивают чувствительность индикатора до отклонения его стрелки примерно на треть шкалы и перемещают движок потенциометра R_4 до нулевого показания индикатора. Далее чувствительность индикатора увеличивают и снова регулируют дискриминатор потенциометром R_4, и так до тех пор, пока дискриминатор будет точно сбалансирован. После этого измерительный контур включают в схему (при выключенном питании и выведенном потенциометре R_5).

Катушки прибора намотаны на каркасах диаметром 8 *мм* с карбонильными сердечниками. Катушка L_1 состоит из 160 витков, L_2 — из 2×80 витков, L_3 — из 2×45 витков, L_4 — из 60 витков и L_5 — из 550 витков провода ПЭШО-0,1.

Индикаторный прибор присоединяют так, чтобы стрелка отклонялась вправо, если измеряемые емкость или индуктивность больше показываемого значения. Градуировку можно произвести при помощи другого измерительного прибора или набора образцовых емкостей и индуктивностей.

3. Как известно, относительная расстройка колебательного контура, вызванная малым изменением его емкости ΔC, пропорциональна этому изменению: $\Delta f/f = \Delta C/2C$. Это обстоятельство используют в резонансных приборах для измерения малых емкостей. Такой прибор состоит из генератора высокой частоты и частотного или фазового детектора с индикаторным прибором (вольтметром) на выходе (рис. 97). Напряжение на выходе детектора $U = fSC_x/2C$, где S — крутизна характеристики детектора.

Подобный прибор позволяет измерять сотые и тысячные доли пикофарады, отсчитывая их непосредственно по линейной шкале. Генератор его должен быть стабилен по частоте и амплитуде. Из формулы для выходного напряжения видно, что частоту выгодно повышать. Однако это приводит к необходимости уменьшать емкость

контура *C*, а тем самым и верхний предел измерения, потому что измеряемая емкость C_x по соображениям линейности не должна превышать примерно двадцатой части емкости конденсатора $C_н$. Уменьшать же индуктивность катушки *L* нельзя, так как стабильность колебаний генератора связана с добротностью его контура. При

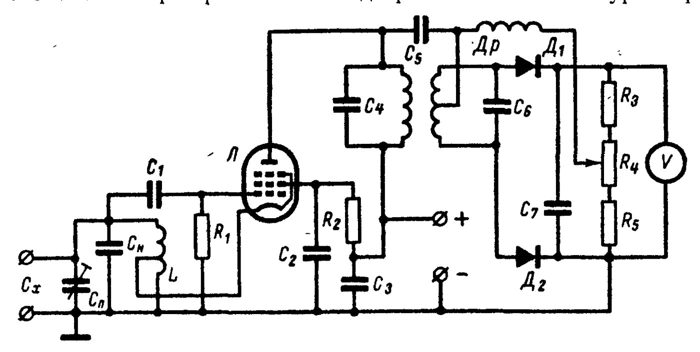


Рис. 97. Схема прибора для измерения малых емкостей по расстройке контура.

относительно низкой частоте генератора повысить чувствительность прибора можно, применяя детектор с высокой крутизной характеристики, например, частотный детектор на лампе типа 6А3П с крутизной характеристики до одного-двух вольт на килогерц.

Положение движка потенциометра R_4 в схеме детектора устанавливают так же, как и потенциометра R_4 в схеме на рис. 96. Конденсатор $C_п$ (воздушный) служит для подстройки контура генератора перед измерением, а также для компенсации паразитной емкости подводящих проводов. Его ручку выводят на переднюю панель.

27. Определение короткозамкнутых витков в катушках индуктивности

Короткое замыкание даже нескольких витков в контурных катушках резко снижает их добротность и тем самым ухудшает избирательность радиоустройства. Замыкание витков в обмотках трансформаторов снижает напряжение, приводит к разогреву катушки и повреждению трансформатора. Поэтому после намотки катушек желательно проверить их на отсутствие короткозамкнутых витков.

На рис. 98 показан внешний вид, а на рис. 99 — схема прибора для определения короткозамкнутых витков в контурных катушках. Существенной частью прибора является генератор, собранный на пентодной части лампы 6Ф1П. Его контурная катушка L_1 намотана на конце ферритового стержня марки Ф-600 диаметром 8 *мм* и закрыта ручкой. Стержень может быть отнесен от корпуса прибора на расстояние до метра. Напряжение на экранирующей сетке пентодной части лампы устанавливают (потенциометром *R*) таким,

чтобы генератор работал на пороге срыва колебаний. Если после этого свободный конец стержня ввести внутрь проверяемой катушки L_x, в которой есть короткозамкнутые витки, то генерация сорвется.

Колебания генератора после разделительного усилителя, собранного на триодной части лампы 6Ф1П, детектируются, и выпрямленное напряжение поступает на сетку лампы электронно-светового индикатора 6Е1П. Пока генератор работает, светящийся сектор индикатора полностью открыт, при срыве же генерации он занимает лишь узкую полоску в центре экрана.

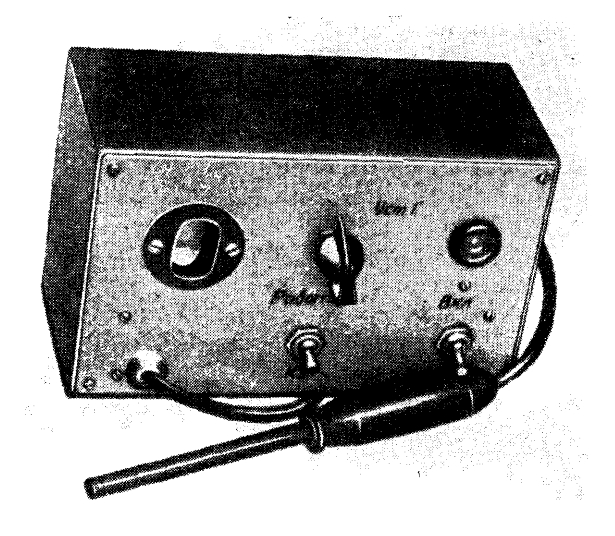


Рис. 98. Внешний вид прибора для испытания катушек на короткозамкнутые витки.

Для настройки генератора рядом с измерительной катушкой L_1 помещена катушка L_2, состоящая из двух витков. Режим генератора устанавливают при помощи потенциометра R таким, чтобы при разомкнутом выключателе $Вк_1$ он генерировал, а при замкнутом генерация срывалась.

Катушка L_1 содержит 4000 витков провода ПЭШО 0,08, а катушка L_2 2 витка провода ПЭВ 0,12. Трансформатор питания *Тр* собран на сердечнике из пластин Ш-20, набор 20 *мм*. Обмотка *I* состоит из 2200 витков провода ПЭЛ 0,2; обмотка II — из 1100 витков ПЭЛ 0,1 и обмотка *III* — из 65 витков ПЭЛ 0,6.

Для обнаружения короткозамкнутых витков используют и другие методы. Например, к проверяемой катушке подносят две другие, одна из которых служит катушкой возбуждения и питается переменным током частотой 800—1000 *гц* или прямоугольными импульсами тока, а вторая является сигнальной катушкой. Если в проверяемой катушке нет короткозамкнутых витков, то в сигнальной катушке

напряжение не индуцируется (э. д. с. от непосредственной связи предварительно компенсируют). Если же короткозамкнутые витки есть, то в сигнальной катушке возникает э. д. с., создаваемая полем короткозамкнутых витков. Можно контролировать не амплитуду индуцируемого напряжения, а его фазу. Тогда э. д. с. от прямой связи между катушкой возбуждения и сигнальной катушкой можно не компенсировать.

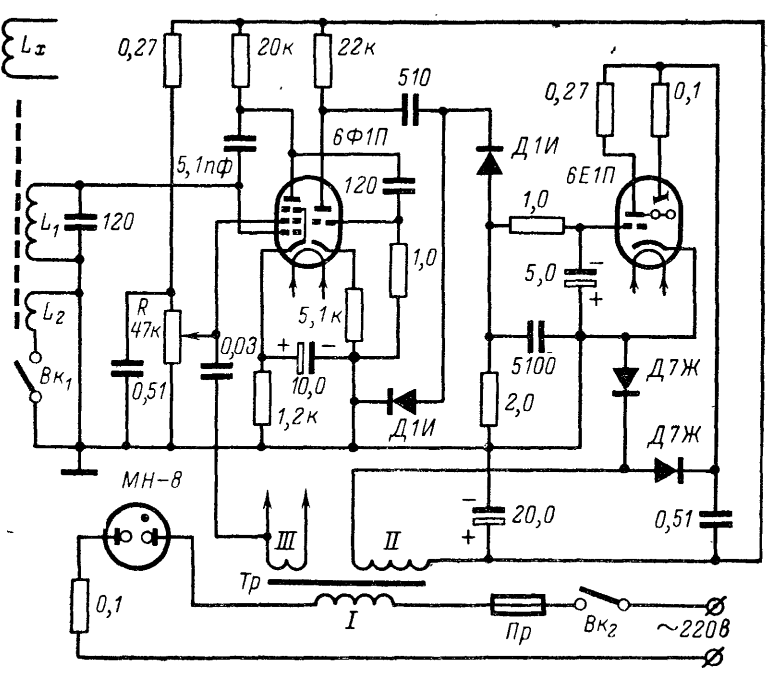


Рис. 99. Схема прибора для испытания катушек на короткозамкнутые витки.

Для проверки телевизионных катушек (строчного трансформатора, отклоняющей системы) используют, например, метод ударного возбуждения контура, образованного проверяемой катушкой и подключенным к ней конденсатором. Продолжительность колебаний зависит от добротности этого контура. Если в катушке есть короткозамкнутые витки, то добротность ее мала и колебания затухают очень быстро. Следовательно, по длительности колебаний можно судить об исправности катушки.

Схема такого прибора приведена на рис. 100. Прибор собран на транзисторах и питается напряжением 3 *в* от двух гальванических элементов. Для ударного возбуждения контура такое напряжение недостаточно, поэтому в приборе применен транзисторный преобразователь постоянного напряжения (транзистор T_1), выполненный по

простейшей схеме блокинг-генератора с выпрямителем (полупроводниковый диод $Д_1$). Частота преобразователя около 15 *кгц*, а выпрямленное напряжение 100 *в*.

Проверяемую катушку L_x подключают к зажимам прибора. Для ударного возбуждения контура используется релаксационный генератор, собранный на неоновой лампе $Л_3$. Чтобы прибор не отмечал начальный период возбуждения проверяемого контура, предусмотрено соответствующее периодическое запирание индикаторной части прибора при помощи цепи $R_{10}C_6$. Когда лампа $Л_3$ горит, на

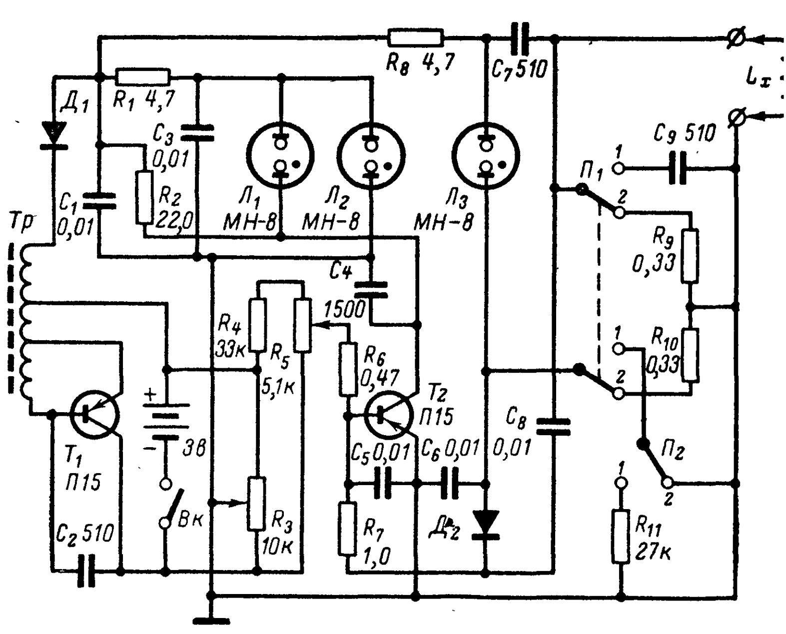


Рис. 100. Схема прибора для проверки телевизионных катушек.

сопротивлении R_{10} создается отрицательное напряжение, запирающее диод $Д_2$ индикаторной части прибора. В этом случае импульсы возбуждения и несколько первых импульсов затухающего колебания, возникающих на проверяемой катушке L_x, не проходят через диод. Когда же напряжение запирания понизится до определенного значения, затухающие колебания будут выпрямляться диодом $Д_2$. При этом заряжается конденсатор C_8 и положительное напряжение, снимаемое с фильтра R_7C_5, поступает на базу транзистора T_2. Если проверяемая катушка имеет короткозамкнутые витки, то затухающие колебания будут существовать такой короткий отрезок времени, что режим транзистора T_2 не изменится.

Индикаторная часть прибора собрана на транзисторе T_2 и неоновых лампах $Л_1$ и $Л_2$. Лампа $Л_1$ имеет более низкий (примерно на 3 *в*) порог зажигания, чем лампа $Л_2$, а напряжение зажигания

лампы $Л_2$ отличается от напряжения ее гашения на 10—15 *в*. Индикатор работает следующим образом. Когда смещение на базе транзистора T_2 имеет отрицательную полярность, напряжение на его коллекторе близко к нулю (из-за большого падения напряжения на нагрузочном сопротивлении резистора R_2). Неоновая лампа $Л_1$ при этом должна загореться. Лампа же $Л_2$ не может загореться из-за падения напряжения на сопротивлении резистора R_1.

При проверке какой-либо катушки телевизора, например строчного трансформатора (положение *2* переключателя $П_1$), положительное напряжение, возникающее на конденсаторе C_8 и зависящее от качества проверяемой катушки, запирает транзистор T_2 и гасит лампу $Л_1$. Тогда, медленно поворачивая ручку потенциометра R_5

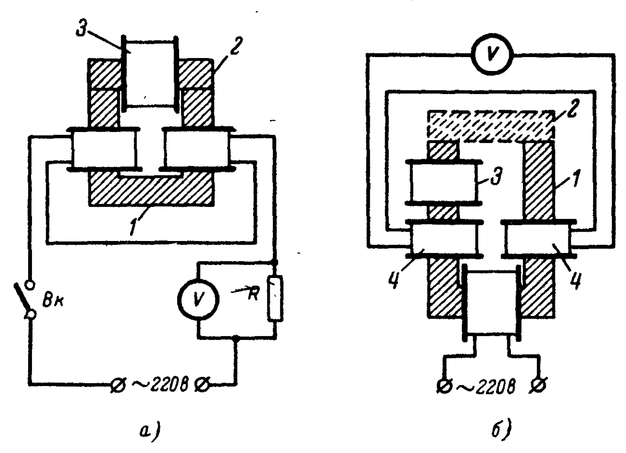


Рис. 101. Устройства для определения короткозамкнутых витков в катушках трансформаторов и дросселей.

а — простое устройство; *б* — устройство с катушками сравнения.

балансировки моста (от нижнего к верхнему по схеме положению), стараются получить примерно нулевое напряжение на базе транзистора T_2. При этом транзистор будет почти заперт и его коллекторное напряжение возрастет примерно на 10—15 *в*, а это приведет к тому, что лампа $Л_1$ погаснет и одновременно загорится лампа $Л_2$ (на этих лампах собраны два низкочастотных релаксационных генератора). Лампа $Л_1$ оказывает свое влияние на лампу $Л_2$ до тех пор, пока рабочее ее напряжение не упадет до напряжения гашения, а это может произойти, когда на базу транзистора T_2 будет подано большое отрицательное напряжение (движок потенциометра R_5 в нижнем по схеме положении).

Этим прибором можно проверить и катушки отклоняющих систем телевизоров. Так как отклоняющие системы, например катушки строк, имеют значительно меньшую индуктивность, чем строчные трансформаторы, и значительно меньшую собственную распределенную емкость, то параллельно проверяемой катушке

подключают (положение *1* переключателя Π_1) дополнительный конденсатор C_9 и, кроме того, отключают шунтирующий резистор R_9.

При измерении относительно малых индуктивностей постоянную времени задержки измерительной цепи снижают переключателем Π_2. В положении *2* (низкоомные) этого переключателя конденсатор C_6 замыкается накоротко, а в положении *1* (высокоомные) он включается через резистор R_{11} и постоянная времени снижается более чем в 10 раз, так как сопротивление резистора R_{11} меньше сопротивления резистора R_{10}.

Для проверки катушек трансформаторов и дросселей на короткозамкнутые витки можно воспользоваться также следующим несложным способом. На стержневой сердечник *1* из трансформаторной стали (желательно марки Э-330) со съемным ярмом *2* наматывают катушку, которую через резистор *R* подключают к электросети (рис. 101, *а*). При напряжении электросети 220 *в* число витков катушки может быть примерно 10 000/*s*, где *s* — сечение сердечника, *см*². Падение напряжения на резисторе *R* контролируется вольтметром *V*. Сначала замечают напряжение на резисторе без проверяемой катушки *3*, а затем с надетой на ярмо катушкой. Если в ней есть короткозамкнутые витки, то показания вольтметра при надетой катушке увеличатся.

Чувствительность этого простого устройства можно повысить, выполнив его по дифференциальной схеме (рис. 101, *б*). На стержневой сердечник *1* наматывают сетевую катушку и, кроме того, размещают на нем две одинаковые катушки *4*. Эти катушки включены встречно, и разность напряжений на них измеряется электронным вольтметром *V*. Проверяемую катушку *3* надевают на один из стержней сердечника. При наличии в ней короткозамкнутых витков у катушек *4* возникает разностное напряжение, которое и отмечается вольтметром. Такое устройство очень чувствительно и может работать даже без ярма *2* сердечника.

28. Испытания дросселей и трансформаторов низкой частоты

Мы рассмотрим здесь методы простейших измерений параметров различных трансформаторов и дросселей с сердечниками из трансформаторной стали. Такие измерения необходимы при испытании трансформатора или дросселя после их изготовления, при поисках неисправностей в том или ином радиоустройстве, а также при определении данных неизвестного трансформатора, приобретенного, например, случайно или снятого со старого радиоаппарата.

Начнем с определения числа витков катушки неизвестного трансформатора. Для этого надо прежде всего подобрать подходящий сердечник из трансформаторной стали (желательно марки Э-330) и намотать на него сетевую катушку (число ее витков для напряжения 220 *в* должно быть около 10 000/*s*, где *s* — сечение сердечника, *см*²). Сняв затем измеряемую катушку с сердечника неизвестного трансформатора, надевают ее на один из стержней сердечника с сетевой обмоткой. На другом стержне этого сердечника размещают образцовую катушку с заведомо бóльшим числом витков, чем у измеряемой (по размерам она несколько больше измеряемой катушки). Измеряемую и образцовую катушки соединяют последо-

вательно и встречно, и разность напряжений на них (при включенной сетевой катушке) измеряют электронным вольтметром. Напряжение на образцовой катушке должно быть больше, чем на измеряемой. Тогда отматывают несколько витков с образцовой катушки и замечают, на сколько уменьшилось разностное напряжение. Пересчитав его на один виток, находят приблизительно, сколько еще нужно отмотать витков. При этом надо считать отмотанные витки. Когда же напряжения на обеих катушках станут одинаковыми, то это будет означать, что и число витков у них одно и то же.

Таким образом можно довольно точно (до десятых долей процента) определить число витков проверяемой катушки. Измерения при этом можно ускорить, если образцовую катушку сделать с многими отводами и переключателем. Однако такого рода измерения радиолюбителю приходится выполнять нечасто, и поэтому изготовление этой сложной катушки вряд ли будет оправдано.

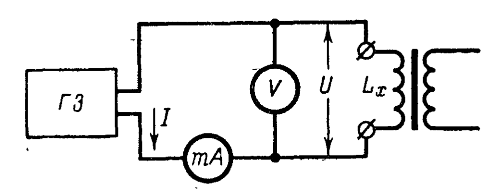


Рис. 102. Схема измерения индуктивности обмотки трансформатора или дросселя.

Просто и быстро, но менее точно число витков катушки можно определить и не снимая ее с сердечника. Для этого поверх катушки наматывают десять или больше витков, подключают эту вспомогательную обмотку к источнику переменного напряжения в 6,3 *в* (к накальной обмотке какого-либо трансформатора питания) и измеряют напряжение на катушке. Число ее витков при этом будет во столько раз больше числа витков вспомогательной обмотки, во сколько раз больше на ней напряжение.

Примерно так же определяют концы сетевой, повышающей и других обмоток трансформатора питания. Его обмотку из самого толстого провода подключают к накальной обмотке другого трансформатора питания и измеряют напряжения на обмотках проверяемого трансформатора.

Для измерения коэффициента трансформации низкочастотного трансформатора на одну из его обмоток подают напряжение от звукового генератора и измеряют затем напряжения на обеих обмотках электронным вольтметром. Коэффициент трансформации находят как отношение напряжений на обмотках. Трансформатор при этом должен быть не нагружен, а частота генератора должна быть в полосе рабочих частот трансформатора.

Индуктивность обмотки трансформатора или дросселя может быть измерена при помощи моста переменного тока. Более просто, но менее точно ее можно измерить и методом вольтметра-амперметра. Для этого на обмотку трансформатора (или дросселя) подают напряжение *U* от сети переменного тока или генератора звуковой частоты *ГЗ*, которое измеряют вольтметром *V* (рис. 102). Последо-

вательно с обмоткой включают миллиамперметр mA для отсчета протекающего через нее тока I. Если пренебречь потерями в обмотке и сердечнике, то индуктивность

$$L_x \approx \frac{0,159U}{fI},$$

где f — частота питающего напряжения (индуктивность следует определять на одной из низших рабочих частот трансформатора).

Более точное значение индуктивности получается при расчете по формуле

$$L_x = \frac{1}{2\pi f}\sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2}, \qquad (13)$$

где под R понимается сопротивление потерь (это сопротивление определить трудно, поэтому без большой погрешности можно принять за R сопротивление обмотки, измеренное на постоянном токе омметром).

Выходные трансформаторы в однотактных каскадах и дроссели фильтров работают с подмагничиванием, что снижает их индуктивность. Поэтому индуктивность обмоток этих трансформаторов и дросселей нужно измерять тоже при подмагничивании. Одна из схем для таких измерений показана на рис. 103, *а*. Измерения производят методом вольтметра-амперметра. Ток подмагничивания устанавливают резистором $R_п$. Дроссель $Др_р$ в этой схеме препятствует прохождению переменного тока через цепь постоянного. Его индуктивность должна быть намного больше индуктивности L_x измеряемого дросселя или трансформатора. Конденсатор $C_р$ разделяет цепи постоянного и переменного токов. При этом индуктивность

$$L_x \approx \frac{u}{2\pi fi}.$$

Если индуктивность разделительного дросселя $Др_р$ недостаточна, то измерения можно выполнить по схеме на рис. 103, *б*. Здесь последовательно с измеряемой обмоткой L_x дросселя или трансформатора включен образцовый резистор $R_о$, сопротивление которого намного меньше индуктивного сопротивления обмотки L_x (обычно $R_о = 1$ *ом*). При положении *2* переключателя *П* измеряют падение напряжения $u_о$ на резисторе $R_о$, по которому затем определяют проходящий через обмотку L_x ток $i_о = u_о/R_о$. Так как форма этого тока несинусоидальна, нужно применять вольтметр, измеряющий действующее значение напряжения. В положении *1* переключателя *П* измеряют действующее значение переменного напряжения U. В этом случае индуктивность

$$L_x \approx \frac{UR_о}{2\pi fu_о}.$$

Можно вообще отказаться от разделительного дросселя $Др_р$ и заменить его пентодом (рис. 103, *в*). Схема при этом получается проще и результат измерения оказывается более точным. Тот или иной пентод выбирают в зависимости от необходимого тока подмагничивания (обычно это пентод типа 6П14П). Большое внутреннее сопротивление пентода увеличивается еще больше отрицательной обратной связью по току, поэтому цепь подмагничивания не шун-

тирует измерительную цепь переменного тока. Ток подмагничивания устанавливают грубо резистором R_1, а более точно резистором R_2. Индуктивность L_x вычисляют по формуле (12) или (13). В последнем случае под R понимают суммарное сопротивление миллиамперметра переменного тока, обмотки измеряемого дросселя или трансформатора и выходного сопротивления питающего трансформатора *Тр*.

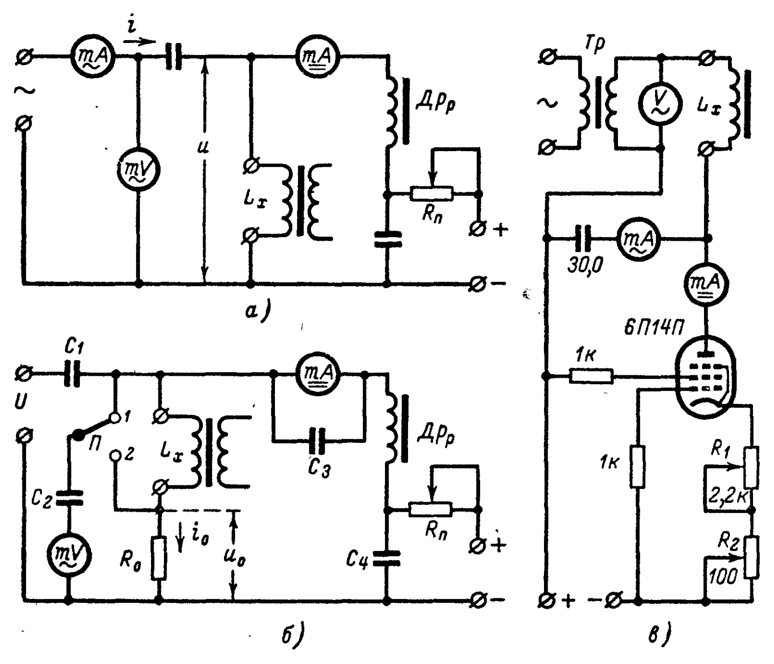


Рис. 103. Схемы измерения индуктивности обмотки трансформатора или дросселя, работающих с подмагничиванием.

а — при достаточно большой индуктивности разделительного дросселя $Др_р$; *б* — то же при малой индуктивности разделительного дросселя $Др_р$; *в* — то же с пентодом в качестве генератора тока подмагиичивания.

Если одну из обмоток трансформатора замкнуть накоротко и измерить индуктивность другой при помощи, например, моста переменного тока, то будет получена индуктивность рассеяния трансформатора. Измерения выполняют на частотах не выше 2 *кгц* с тем, чтобы собственная емкость трансформатора не повлияла на результат.

Схема для измерения собственной емкости трансформатора показана на рис. 104. Трансформатор *Тр* работает без нагрузки. Его вторичная обмотка *II* подключена к электронному вольтметру *V* с высоким входным сопротивлением и малой емкостью, а на первичную обмотку *I* подается напряжение от звукового генератора *ГЗ*

с плавной настройкой. Выходное сопротивление генератора должно быть меньше активного сопротивления первичной обмотки трансформатора. Изменяя частоту генератора и поддерживая его выходное напряжение неизменным, находят ту частоту f, при которой напряжение на вторичной обмотке максимально. Этот резонанс обусловлен индуктивностью рассеяния и собственной емкостью трансформатора и наблюдается за пределами его высшей рабочей частоты. Затем измеряют индуктивность рассеяния L_s трансформатора со стороны вторичной обмотки и находят приведенную ко вторичной обмотке собственную емкость трансформатора по формуле

$$C = \frac{2{,}54 \cdot 10^{-2}}{f^2 L_s} - C_{\text{в}},$$

где $C_{\text{в}}$ — входная емкость вольтметра.

Можно обойтись и без измерения индуктивности рассеяния. Для этого определяют две резонансных частоты: первый раз как было описано, а второй при подключенном параллельно вторичной обмотке дополнительном конденсаторе небольшой емкости $C_{\text{д}}$. В этом случае собственная емкость трансформатора

$$C = \frac{C_{\text{д}}}{\frac{f_1^2}{f_2^2} - 1}.$$

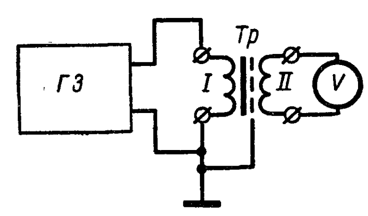


Рис. 104. Измерение собственной емкости трансформатора.

При измерении собственной емкости трансформатора необходимо соблюдать те же условия, в которых он будет работать. Например, если трансформатор предназначен для работы на несимметричную нагрузку, то и применяемый при измерениях вольтметр должен быть несимметричным. Измерения выполняют при том же порядке подключения концов обмоток, что и при рабочих условиях (с тем же экраном, цепью заземления и др.).

Эффективность внешнего экрана проверяют так. Трансформатор помещают в равномерное магнитное поле. Электронным вольтметром измеряют наведенное на вторичной обмотке напряжение без экрана и с экраном. Отношение этих напряжений и покажет эффективность экранирования. Магнитное поле для этого можно получить в соленоиде диаметром 25—40 *см* и длиной 60—80 *см*, через который пропускается ток нужной частоты. Эффективность внутреннего электрического экрана, разделяющего первичную и вторичную обмотки и уменьшающего емкость между ними, проверяют, прикладывая напряжение генератора между соединенными накоротко концами первичной обмотки и заземленным экраном и измеряя наведенное на вторичной обмотке напряжение.

Частотную характеристику трансформатора снимают в условиях, аналогичных условиям его работы (по виду нагрузки, симметрии, экранировки, сопротивлению на входе). Напряжение на первичную обмотку подают настолько малое, насколько позволяет чувствительность электронного вольтметра. В процессе измерений напряжение генератора поддерживают неизменным.

Температуру обмотки дросселя или трансформатора, нагретой проходящим через нее током, можно определить по увеличению ее сопротивления постоянному току. Сначала омметром измеряют сопротивление обмотки R_1 при комнатной температуре t_1. Затем трансформатор (или дроссель) на некоторое время подключают к источнику питания, а потом, отключив его, второй раз измеряют сопротивление той же обмотки R_2. Среднюю температуру t_2 нагретой обмотки (имеется в виду обмотка из медного провода) после этого вычисляют по следующей формуле:

$$t_2 = 250\,\frac{R_2 - R_1}{R_1} + t_1.$$

29. Измерение добротности колебательных контуров и катушек индуктивности

При однократном (ударном) возбуждении колебательного контура амплитуды напряжения и тока убывают во времени (рис. 105). Причиной этого являются потери, сопутствующие обмену энергии между конденсатором и катушкой индуктивности контура. Скорость убывания во времени (затухания) амплитуд существенно характеризует качество контура. За меру затухания можно принять одну из нескольких взаимосвязанных величин: декремент колебания, логарифмический декремент затухания, коэффициент затухания колебаний, затухание, добротность.

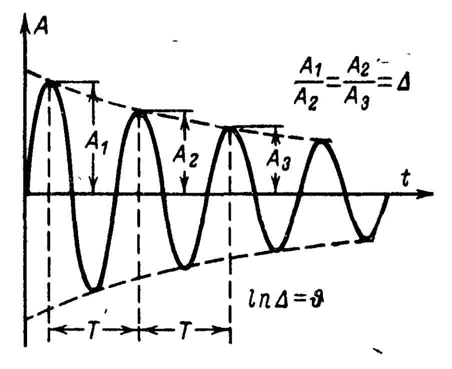


Рис. 105. Затухающие колебания в катушке.

Декремент колебания Δ численно равен отношению любой предыдущей амплитуды к последующей при условии, что интервал времени между ними составляет один период T. Значение Δ при затухающих колебаниях всегда больше единицы. На практике пользуются обычно не декрементом колебания, а его натуральным логарифмом, называемым логарифмическим декрементом затухания

$$\vartheta = \ln \Delta = \frac{\pi r}{\rho},$$

где r — сопротивление потерь контура в последовательной схеме; ρ — характеристическое (волновое) сопротивление контура.

Логарифмический декремент затухания численно равен относительному уменьшению амплитуд за один период T. Если, например, $\vartheta = 0{,}02$, то каждая амплитуда на 2% меньше предыдущей.

Величина

$$d = \frac{\vartheta}{\pi} = \frac{r}{\rho}$$

называется затуханием контура, а величина, обратная затуханию, носит название добротности контура

$$Q = \frac{1}{d}.$$

Добротность — один из основных параметров, характеризующих качество контура и отдельных его элементов. Так как при резонансе $\omega_0 L = 1/\omega_0 C$, то $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$, а добротность

$$Q = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{\omega_0 rC}.$$

Применительно к последовательному контуру добротность показывает, во сколько раз повышается напряжение на его реактивных

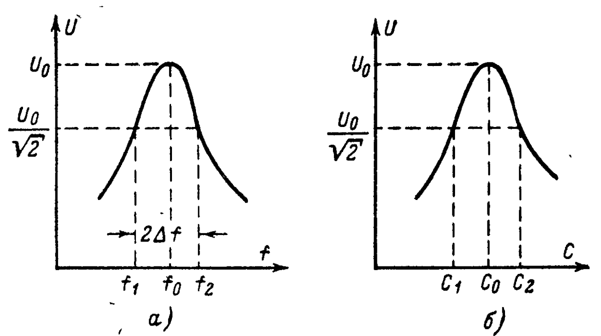


Рис. 106. Резонансные кривые контура для определения его добротности.

а — методом вариации частоты; *б* — методом вариации емкости.

элементах благодаря резонансу по сравнению с действующей в нем э. д. с. Относительное значение полосы пропускания контура связано с его добротностью следующим образом:

$$\frac{2\Delta f}{f_0} = \frac{1}{Q}.$$

Методы измерения добротности полностью вытекают из определения этой величины. Один из них заключается в том, что снимают резонансную кривую контура и по ней определяют относительное значение полосы пропускания $2\Delta f/f_0$. Расстройку контура можно производить как изменением частоты генератора (метод вариации частоты), так и изменением емкости контура (метод вариации емкости). Резонансные кривые для обоих случаев показаны на рис. 106. Определив ширину кривой резонанса $2\Delta f$ на уровне $1/\sqrt{2} = 0{,}707$

от ее максимума, рассчитывают добротность в первом случае по формуле

$$Q = \frac{f_0}{2\Delta f},$$

а во втором — по формуле

$$Q = \frac{2C_0}{C_2 - C_1}.$$

Очевидно, что снимать всю кривую резонанса контура нет необходимости, а достаточно лишь определить три точки на ней. При использовании метода вариации частоты это можно сделать при помощи генератора с плавной настройкой и электронного вольтметра переменного тока. Вначале генератор настраивают на резонансную частоту f_0 контура, отмечая этот момент по максимальному показанию вольтметра. Затем уменьшают частоту генератора до тех пор, пока напряжение на контуре не уменьшится в 1,4 раза, и отмечают новое значение частоты f_1. Далее увеличивают частоту генератора, пока напряжение, пройдя максимальное значение при резонансной частоте, снова уменьшится до значения, которое оно имело при частоте f_1, и отмечают это новое значение частоты f_2. После этого определяют полосу пропускания $2\Delta f = f_2 - f_1$ и по приведенной выше формуле рассчитывают добротность. При измерениях связь генератора с контуром должна быть настолько слабой, насколько это возможно для уверенных отсчетов по вольтметру (можно, например, ввести дополнительную катушку связи). Последний же не должен вносить в контур дополнительных потерь и расстройки.

Такие же измерения, но с меньшей точностью, можно провести и при помощи гетеродинного индикатора резонанса, который сначала настраивают на резонансную частоту контура f_0 по минимальному показанию прибора, а затем уменьшают и увеличивают его частоту до значений f_1 и f_2 по уменьшению показаний прибора в 1,4 раза от его показания при резонансе.

При измерении методом вариации емкости необходимо иметь в контуре конденсатор переменной емкости. В этом случае частоту генератора оставляют неизменной, а изменяют емкость конденсатора, отмечая ее значение C_0 при настройке в резонанс и два других значения $C_2 < C_0$ и $C_1 > C_0$, при которых напряжение на контуре уменьшается в 1,4 раза по сравнению с напряжением при резонансе.

Недостаток обоих методов заключается в необходимости точного измерения изменений частоты или емкости. Так как эти изменения малы (при $Q = 100$ и $f_0 = 1$ *Мгц* изменение составляет 1%), их можно определить лишь приблизительно. В промышленных приборах для измерения добротности (куметрах) добротность измеряется резонансным методом непосредственно, без промежуточных расчетов. Идея измерения основана на том, что при настройке последовательного контура в резонанс с частотой питающего генератора напряжение на емкости U_C или индуктивности U_L больше действующей в контуре э. д. с. U в Q раз, т. е. $Q = U_C/U = U_L/U$. Таким образом, достаточно измерить эти напряжения и сравнить их. Если одно из них поддерживать постоянным, то вольтметр, измеряющий

другое напряжение, можно проградуировать непосредственно в единицах добротности.

Блок-схема куметра показана на рис. 107. Она включает в себя генератор высокой частоты *ГВЧ* с плавной настройкой, термоэлектрический миллиамперметр *mA*, измеряющий ток I через образцовый резистор R_0, образцовый конденсатор переменной емкости C_0 и электронный вольтметр V для измерения напряжения U_C на образцовом конденсаторе. Приложенное к контуру напряжение определяется как IR_0 и добротность $Q = U_C/IR_0$. Пределы измерения добротности устанавливают регулировкой тока I. Шкалу миллиамперметра градуируют при этом в значениях коэффициента k ($k = 1$, 2, 3...), называемого множителем добротности.

При измерении добротности катушки L_x (она равна добротности контура, если пренебречь потерями в конденсаторе) ее подключают к зажимам куметра и устанавливают ту частоту генератора, на которой хотят измерить добротность. Затем образцовым конденсатором настраивают контур на частоту генератора по максимальному

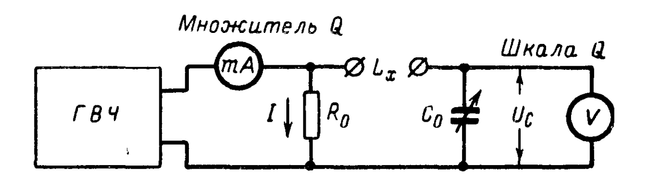


Рис. 107. Блок-схема измерителя добротности (куметра) колебательного контура.

показанию вольтметра. Стрелка миллиамперметра (множителя добротности) должна быть установлена на такую отметку (цифру), при которой добротность указывалась бы по возможности во второй половине шкалы вольтметра.

Сопротивление образцового резистора R_0 должно быть во много раз меньше сопротивления r контура в последовательной схеме (напомним, что оно связано с сопротивлением R в параллельной схеме соотношением $R = (\omega_0 L)^2/r$). Только в этом случае можно считать, что весь ток I генератора проходит через резистор R_0 и создает на нем номинальное падение напряжения. Если, например, $r = 4$ *ом* и погрешность от R_0 не должна превышать 1%, то сопротивление образцового резистора должно быть 0,04 *ом* или меньше. В этом заключается одна из трудностей самостоятельного изготовления таких куметров. При питании же контура от генератора напряжения трудно обеспечить столь малое выходное сопротивление генератора на высоких частотах.

Входное сопротивление электронного вольтметра оказывает влияние на добротность контура. Поэтому применяют вольтметры с высоким входным сопротивлением и, кроме того, часто включают их через емкостные делители напряжения.

Куметры пригодны и для измерения индуктивностей катушек. Измеряемую катушку подключают к зажимам куметра и настраивают контур в резонанс с частотой генератора. Индуктивность

(в генри) рассчитывают затем по формуле

$$L_x = \frac{1}{39{,}5 f^2 C_0}.$$

На рис. 108 показан внешний вид куметра типа Е9-1 (КВ-1), позволяющего измерять добротность в пределах от 25 до 625 на частотах от 50 *кгц* до 50 *Мгц* и индуктивность от 0,1 *мкгн* до 100 *мгн*. В этом куметре применен ленточный образцовый резистор сопротивлением 0,04 *ом*.

Другой низкочастотный куметр типа Е9-3 (ИДН-1) показан на рис. 109. Он имеет пределы измерения добротности от 2 до 300 и индуктивности от 100 *мкгн* до 10 *гн* в диапазоне частот 1—100 *кгц*. В отличие от куметра Е9-1, в этом измерителе добротности нет образцового резистора и измерительный контур питается от генератора напряжения. Для уменьшения выходного сопротивления генератора на его выходе предусмотрен катодный повторитель на лампе типа 6П14П, в катодную цепь которой включен согласующий трансформатор с коэффициентом трансформации $n = 0{,}0302$. Выходное сопротивление такого каскада $R_{\text{вых}} \approx n^2/S$, где S — крутизна лампы. В данном случае оно примерно равно 0,1 *ом*. Трансформатор намотан на ленточном магнитопроводе из стали марки Э-330 и содержит в первичной обмотке 230 витков провода ПЭЛШО 0,15, а во вторичной 7 витков ПЭВ-2 0,1. Очевидно, что так решать проблему подачи напряжения на измерительный контур можно лишь в низкочастотных куметрах.

Погрешности измерения добротностей куметрами составляют несколько (4—6) процентов.

При наличии осциллографа добротность контура может быть рассчитана по его декременту колебания, который нетрудно определить по картине затухающих колебаний на экране осциллографа при периодическом ударном возбуждении контура.

Добротность контура можно определить и целым рядом других методов, например методом добавочного образцового резистора, методом счета амплитуд и др.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ

30. Образцовые частоты

При градуировке и поверке радиопередающих, радиоприемных и измерительных устройств возникает необходимость в точном измерении частоты. Для этого служат кварцевые калибраторы или высокостабильные диапазонные сигнал-генераторы. Последние в свою очередь поверяются по образцовым частотам, передаваемым радиостанциями Службы времени и частоты НИИФТРИ. По сигналам этих радиостанций можно проверить градуировку шкалы радиоустройства и без кварцевого калибратора. Расписание передач сигналов точного времени и образцовых частот издается ежегодно Издательством стандартов. Оно дается по всемирному времени, которое равно московскому минус три часа.

Передача образцовых частот ведется радиостанциями с позывными РВМ, РАТ, РЕС, РОР, РЦЖ и РВ-166. Эти радиостанции (кроме РВ-166) работают в телеграфном режиме и передают образцовые частоты 25 *кгц*, 100 *кгц*, 200 *кгц*, 5 *Мгц*, 10 *Мгц* и 25 *Мгц*. Относительная погрешность передаваемой образцовой частоты, т. е. ее отклонение от номинального значения, не превышает $\pm 2 \cdot 10^{-9}$, а относительная суточная нестабильность частоты, т. е. изменение частоты в течение суток, не превышает $\pm 5 \cdot 10^{-10}$.

Радиостанция РВ-166 работает круглосуточно с перерывами на профилактику по понедельникам с 01.00 до 10.00 и техосмотр ежедневно с 17.00 до 22.00 и передает несущую частоту, модулированную радиовещательной программой.

Радиостанция с позывными РЕС работает также круглосуточно с перерывами на осмотр ежедневно с 20.00 до 21.00 и профилактику в первую и третью среду и третий вторник каждого месяца. Она передает несущую частоту 100 *кгц*.

31. Кварцевые калибраторы

Кварцевые калибраторы позволяют с высокой степенью точности градуировать и проверять градуировку радиоустройств по опорным точкам, соответствующим гармоникам основной частоты колебаний кварцевого генератора.

На рис. 110 показана схема универсального кварцевого калибратора. Он содержит генератор с кварцами на 100 *кгц*, 1 *Мгц* и

10 *Мгц*, синхронизируемый кварцевым генератором мультивибратор с частотами следования импульсов 10 *кгц* и 100 *кгц*, звуковой генератор на 800 *гц* для модуляции колебаний генератора и выходной каскад.

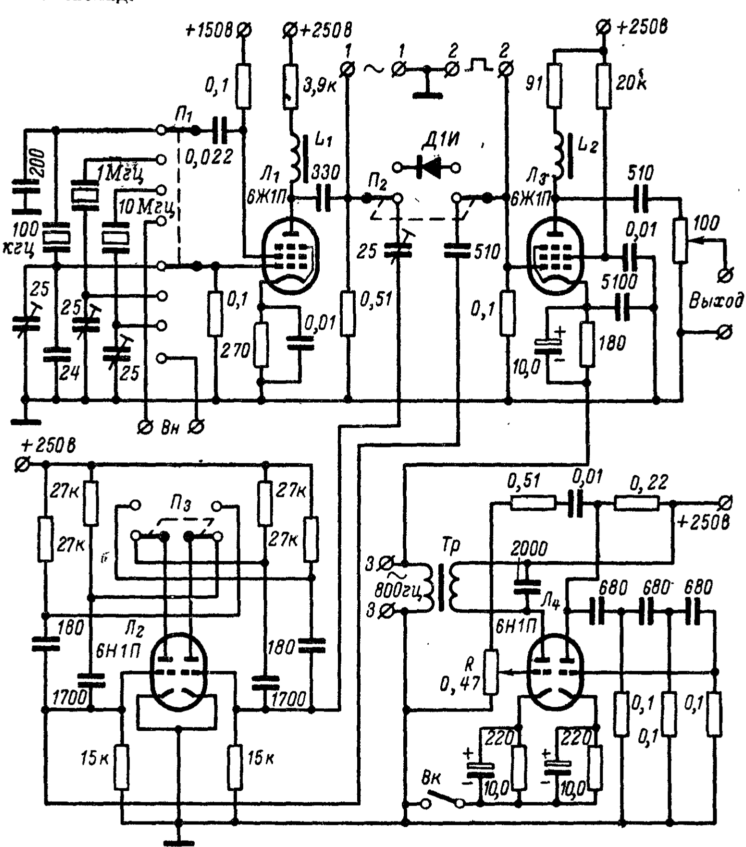


Рис. 110. Схема универсального кварцевого калибратора.

Кварцевый генератор собран на пентоде $Л_1$ типа 6Ж1П по схеме с электронной связью с нагрузкой. В качестве анода используется экранирующая сетка этой лампы, а анод ее служит выходным электродом, связанным с генератором только через электронный поток. Такой генератор эквивалентен объединенным в одной лампе задающему генератору и буферному усилителю. Частота генератора с электронной связью практически не зависит от сопротивления нагрузки.

В генераторе используется схема с емкостной обратной связью, в которой индуктивность между управляющей сеткой и анодом

лампы заменена кварцем. Частота колебаний генератора f получается такой, при которой индуктивное сопротивление кварца равно емкостному сопротивлению внешней для него цепи. Если считать добротность кварца бесконечно большой, а внешняя цепь не нагружает кварц, то частота f связана с частотой последовательного резонанса кварца $f_р$ следующим соотношением:

$$f = f_р \sqrt{1 + \frac{C_1}{C_0 + C_{сх}}},$$

где C_1 — эквивалентная емкость кварца;
C_0 — емкость кварцедержателя и электродов с кварцевым диэлектриком;
$C_{сх}$ — емкость внешней цепи (схемы), к которой подключается кварц.

Это дает возможность изменением емкости $C_{сх}$ менять в небольших пределах (стотысячные доли) частоту генератора. В схеме предусмотрены воздушные подстроечные конденсаторы емкостью 25 *пф*, при помощи которых производится точная подстройка частот генератора по образцовым частотам. Для переключения кварцев служит переключатель $П_1$.

Мультивибратор собран на двойном триоде $Л_2$ типа 6Н1П. Он может работать на частотах 10 и 100 *кгц* в режиме синхронизации кварцевым генератором. В первом случае генератор включается на 100 *кгц*, во втором на 1 *Мгц*. Переключение частоты колебаний мультивибратора производится переключателем $П_3$ (на схеме мультивибратор показан включенным на частоту 10 *кгц*). Частотный спектр прямоугольных колебаний мультивибраторов очень широк, и частотные отметки прослушиваются в диапазоне многих мегагерц. Десятикилогерцные метки на 10-метровом диапазоне слышны вполне отчетливо.

Между анодом лампы и управляющей сеткой лампы $Л_3$ оконечного каскада переключателем $П_2$ может быть включен полупроводниковый диод (типа Д1И), что позволяет получить гармоники колебаний генератора в 1 и 10 *Мгц* в диапазоне частот до 400 *Мгц*.

Для лучшего отделения частотных меток калибратора от помех, прослушиваемых в градуируемых радиоприемниках, высокочастотный сигнал генератора может быть модулирован звуковой частотой 800 *гц* подачей в катодную цепь оконечной лампы $Л_3$ напряжения от RC генератора, собранного на правом (по схеме) триоде лампы $Л_4$ типа 6Н1П. Левый триод этой лампы работает усилителем мощности с трансформаторным выходом. Глубина модуляции регулируется потенциометром R, который задает амплитуду напряжения звуковой частоты на сетку левого триода. Коэффициент трансформации трансформатора *Тр* около 75 (им может служить выходной трансформатор для лампы 6П14П). Выключается звуковой генератор выключателем *Вк*, объединенным с потенциометром R.

На переднюю панель прибора выведены зажимы, соединенные непосредственно (помимо оконечного каскада) с кварцевым генератором (зажимы *1—1*), мультивибратором (зажимы *2—2*) и звуковым генератором (зажимы *3—3*). Катушки L_1 и L_2 частотной коррекции полосы пропускания могут быть намотаны непосредственно на резисторы анодной нагрузки (3,9 *ком* и 91 *ом*). Индуктивность их подбирают такой, чтобы резонансная частота контура, образованного

этой катушкой и емкостью анод-шасси, находилась в той точке частотной характеристики, где коэффициент усиления каскада без этой катушки уменьшился бы на 6 *дб*.

При наличии описанного кварцевого калибратора сигнал-генератор оказывается ненужным. В самом деле, калибратор дает метки частоты через 10 *кгц* до частот 30—40 *Мгц* и через 1 *Мгц* до 300—400 *Мгц*. Никакой сигнал-генератор такого разрешения по частоте не дает.

Для градуировки приемника генератор устанавливают прежде всего на наивысшую частоту, гармоника которой попадает в градуируемый диапазон. Например, для диапазона средних волн это

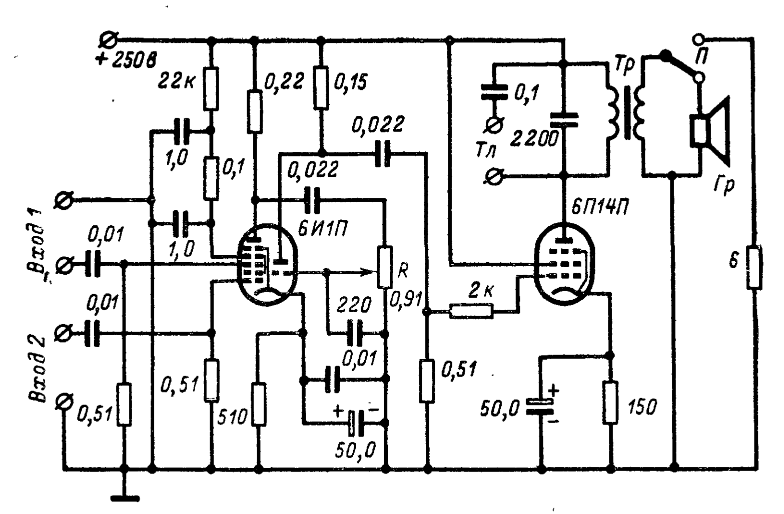


Рис. 111. Схема приставки к кварцевому калибратору для измерения частот по нулевым биения.

будет 1 *Мгц*. Установив эту частоту, делают отметку на шкале. Далее включают кварц на 100 *кгц*, а затем мультивибратор на 10 *кгц* и наносят все промежуточные отметки. Заметим, что мультивибратор дает более сильный сигнал, чем генератор на той же частоте, включенный через диод. Для облегчения градуировки напряжение генератора следует промодулировать звуковой частотой.

При градуировке и поверке генераторов приходится сравнивать частоты кварцевого калибратора и градуируемого генератора. Просто и удобно это можно сделать по нулевым биениям с помощью прибора, схема которого показана на рис. 111. Этот прибор состоит из смесителя, собранного на гептодной части лампы 6И1П, усилителя напряжения низкой (разностной) частоты на триодной части той же лампы и оконечного усилителя мощности на пентоде 6П14П, нагруженного на громкоговоритель *Гр*.

При градуировке генераторов или при измерении неизвестной частоты сигналы двух генераторов подаются на входы смесителя.

Их разностная частота (биение) после усиления слышна в громкоговорителе. Частоту соответствующего генератора изменяют до получения нулевых биений, т. е. пока звук, понижаясь по частоте, перестанет быть слышным. Громкость звука регулируется потенциометром *R* с логарифмической характеристикой.

Входные цепи прибора должны быть тщательно экранированы одна от другой. В оконечном каскаде используется стандартный выходной трансформатор *Тр* под лампу 6П14П. В схеме предусмотрено подключение высокоомных головных телефонов *Тл* и отключение громкоговорителя переключателем *П*.

32. Измерительные генераторы

Измерительные генераторы разделяются на генераторы стандартных сигналов (ГСС) и генераторы сигналов (сигнал-генераторы). Генераторы стандартных сигналов служат источниками электрических колебаний, калиброванных по частоте, напряжению (мощности) и глубине модуляции. Сигнал-генераторы представляют собой источники электрических колебаний, не калиброванных по напряжению или мощности. В зависимости от частоты и формы выдаваемых сигналов различают генераторы звуковой частоты, импульсов, генераторы синусоидальных колебаний высокой частоты, генераторы сигналов специальной формы и генераторы шумовых сигналов.

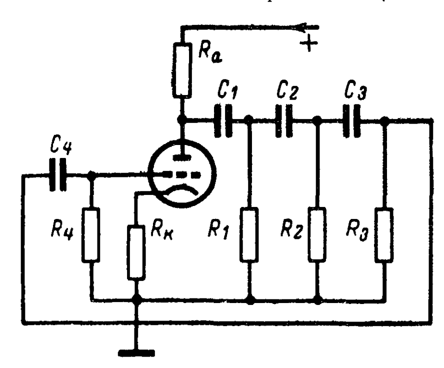


Рис. 112. Схема измерительного *RC*-генератора со звеньями, сдвигающими фазу в сторону опережения.

Генераторы звуковой частоты могут быть разделены на *LC*-генераторы, в которых колебания звуковой частоты возбуждаются в контурах, содержащих индуктивность и емкость, генераторы на биениях, в которых напряжение звуковой частоты образуется в результате биений колебаний двух радиочастотных генераторов, и *RC*-генераторы, в которых колебания возбуждаются в цепях, составленных из резисторов и конденсаторов.

На частотах ниже 100 *кгц* предпочтительно использование *RC*-генераторов благодаря их высокой стабильности частоты, широкому диапазону перестройки и отсутствию громоздких на низких частотах катушек индуктивностей. Различают *RC*-генераторы с многозвенными фазосдвигающими цепями, с мостовыми частотно-зависимыми цепями и с двойными Т-образными мостами.

Генераторы с многозвенными фазосдвигающими цепями наиболее просты. Они удобны в том случае, когда необходимо получить напряжение одной какой-то частоты или частоты, изменяемой в небольших пределах. На рис. 112 показана схема генератора с звень-

ями, сдвигающими фазу в сторону опережения. Минимальное количество звеньев, обеспечивающее поворот фазы на 180° (на другие 180° фазу поворачивает лампа), равно трем. При условии $C_1 = C_2 = C_3 = C$ и $R_1 = R_2 = R_3 = R$ частота колебаний генератора

$$f = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6 + \frac{4R_{вн}}{R}}} \approx \frac{1}{\sqrt{6}\cdot 2\pi RC},$$

где $R_{вн} = R_i R_a/(R_i + R_a)$ — выходное сопротивление лампы.

Из этого выражения видно, что частота RC-генератора обратно пропорциональна первой степени, а не корню квадратному из емкости, как это имеет место в LC-генераторах.

Необходимое для самовозбуждения такого генератора минимальное усиление каскада

$$K_{мин} = 29 + 24\frac{R_{вн}}{R} + 4\left(\frac{R_{вн}}{R}\right)^2.$$

У генератора с четырехзвенной фазосдвигающей цепью при $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C$ и $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ частота колебаний

$$f = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{\frac{10\left(1 + \frac{R_{вн}}{R}\right)}{7 + \frac{R_{вн}}{R}}}},$$

а минимально необходимый коэффициент усиления $K_{мин} = 20$ при $R_{вн}/R = 0{,}1$ и $K_{мин} = 29$ при $R_{вн}/R = 0{,}5$.

На рис. 113 показана схема генератора с трехзвенной цепью, сдвигающей фазу в сторону отставания. Для очень низких частот она не годится, потому что цепь связи C_5R_9 должна иметь в этом случае очень большую постоянную времени. Частота колебаний генератора с трехзвенной цепью такого рода $f = \sqrt{6}/2\pi RC$ выше, чем у генератора со звеньями, сдвигающими фазу в сторону опережения при тех же R и C, а минимально необходимый коэффициент усиления каскада $K_{мин} = 29$.

У генератора с четырехзвенной цепью, сдвигающей фазу в сторону отставания, частота $f = 1{,}19/2\pi RC$, а минимально необходимый коэффициент усиления $K_{мин} = 18{,}6$.

В рассматриваемых генераторах применяют двойные триоды или триод-пентоды, используя одну часть лампы в каскаде генератора, а другую в каскаде его катодного повторителя. Это уменьшает влияние нагрузки на частоту.

У генераторов с многозвенными фазосдвигающими цепями и плавной настройкой амплитуда генерируемого напряжения сильно изменяется по диапазону. В схеме на рис. 113 показана цепь нелинейной отрицательной обратной связи, стабилизирующая напряжение. Напряжение обратной связи подается с анода триода на катод пентода через варистор (нелинейный полупроводниковый резистор) R_8, имеющий отрицательный коэффициент сопротивления по

напряжению. При возрастании напряжения сопротивление варистора уменьшается и глубина обратной связи увеличивается, что приводит к снижению напряжения примерно до первоначального значения.

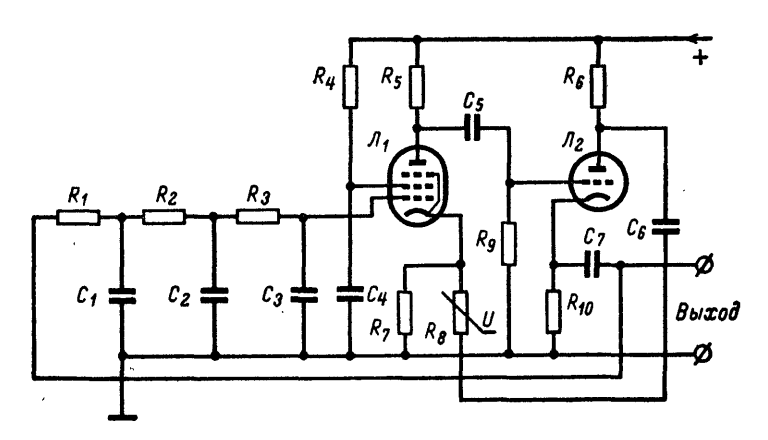


Рис. 113. Схема измерительного *RC*-генератора со звеньями, сдвигающими фазу в сторону отставания.

Плавная перестройка частоты этих генераторов довольно затруднительна. Для диапазона звуковых частот емкость конденсаторов фазосдвигающей цепи выражается в десятках тысяч пикофарад, так как сопротивления резисторов не должны быть более 0,1—1 *Мом*. Поэтому для перестройки нужны строенные или счетверенные резисторы переменного сопротивления. Кроме того, изменения сопротивлений в фазосдвигающей цепи меняют ее затухание, а следовательно, и амплитуду колебаний.

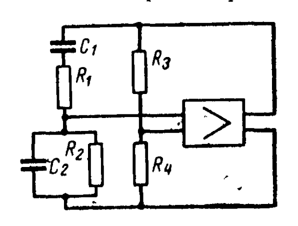


Рис. 114. Схема измерительного *RC*-генератора с мостом Вина.

Более просто эти вопросы решаются в генераторах с частотнозависимыми мостами, в частности с мостом Вина. Поэтому почти все звуковые генераторы с плавной перестройкой частоты в широком диапазоне строятся с мостом Вина по показанной на рис. 114 блок-схеме. Практически принимается $C_1 = C_2 = C$ и $R_1 = R_2 = R$. При этом частота генерации $f = 1/2\pi RC$ и от усилителя (он должен давать нулевой фазовый сдвиг) требуется коэффициент усиления $K_{мин} = 3$.

На рис. 115 приведена схема транзисторного генератора с мостом Вина. Генератор отличается большой стабильностью частоты и амплитуды и может быть рекомендован для изготовления. Схема его была опубликована Б. Хохловым в журнале «Радио» № 9 за 1962 г. и несколько изменена автором книги при изготовлеиии.

Диапазон частот генератора 20 *гц* — 20 *кгц* разделен на три поддиапазона: 20—200 *гц*, 200 *гц* — 2 *кгц* и 2—20 *кгц*. Выбор поддиапазона производится переключением конденсаторов C_1—C_6 моста Вина переключателем *П*, а плавная перестройка частоты в пределах поддиапазона осуществляется сдвоенными резисторами переменного сопротивления R_3 и R_4. Точное сопряжение поддиапазонов достигается тщательным подбором конденсаторов C_1—C_6.

По точности и стабильности для моста больше всего подходят конденсаторы типов МПГ, СГМ и КСГ. Можно, конечно, использовать и конденсаторы типов МБГО и МБГП, но тогда сопряжение

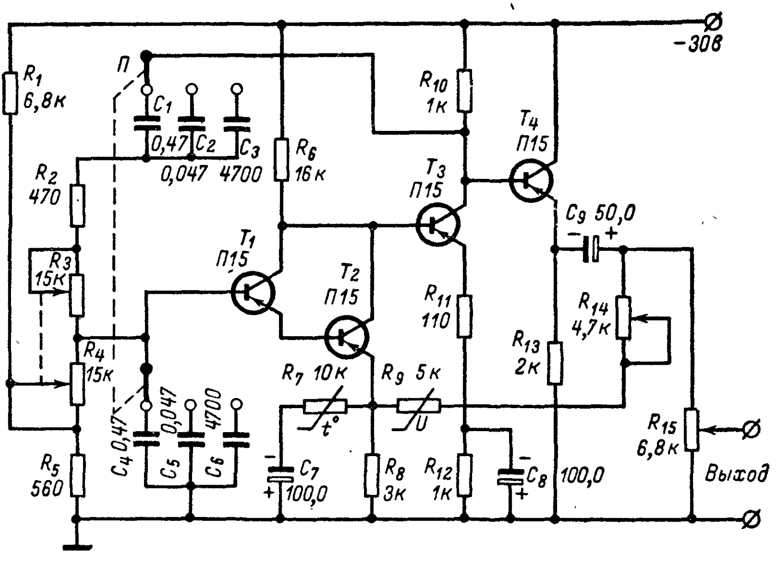


Рис. 115. Схема транзисторного *RC*-генератора низкой частоты.

будет затруднено в связи с необходимостью точного их измерения, так как минимальный допуск у них ± 5%. Резисторы R_3 и R_4 должны иметь логарифмическую характеристику изменения сопротивления, так как только при этом шкала генератора получается наиболее равномерной. Лучше всего для этого подходят сдвоенные непроволочные резисторы типа СП-III группы Б. Эти резисторы перед установкой необходимо проверить. Для этого их соединяют параллельно и подключают к источнику постоянного тока напряжением 20—30 *в*. Между движками резисторов включают вольтметр и, поворачивая их ось, следят за стрелкой вольтметра, которая не должна отклоняться от нуля, если сопротивления резисторов одинаковы при всех углах поворота их оси. Практически можно допустить разность сопротивлений этих резисторов в 1% от их номинального значения.

Генератор выполнен по трехкаскадной схеме. Первый каскад (составной) собран на транзисторах T_1 и T_2, второй (усилительный) —

на транзисторе T_3 и третий (эмиттерный повторитель) — на транзисторе T_4. Резисторы R_1 и R_5 устанавливают режим первого транзистора. Одновременно резистор R_5 совместно с резистором R_2 предотвращает резкие изменения нагрузки усилителя при перестройке частоты генератора.

Для стабилизации амплитуды генерируемого напряжения введена цепь нелинейной отрицательной обратной связи, включающая резисторы R_{14} и малоинерционный термистор R_9 (типа Т8Е или Т8Д). При увеличении выходного напряжения ток через термистор растет, сопротивление его падает и напряжение отрицательной обратной связи в эмиттерной цепи транзистора T_2 повышается, что приводит к уменьшению коэффициента усиления и восстановлению уровня выходного напряжения. Для компенсации зависимости сопротивления термистора от внешней температуры в цепь эмиттера введен еще один терморезистор R_7 (типа ММТ-4). Чтобы постоянная составляющая тока эмиттера не проходила через этот терморезистор и не нагревала его, последовательно с ним включен конденсатор C_7. При повышении окружающей температуры сопротивление терморезистора R_7 падает и компенсирует температурные изменения тока, проходящего через терморезистор R_9.

Резистором R_{14} устанавливают необходимую обратную связь (по наименьшим изменениям генерируемого напряжения при изменениях напряжения питания). Уровень выходного напряжения регулируется потенциометром R_{15} в пределах от 0 до 2,5 *в*.

Генераторы *RC* с двойным Т-образным мостом имеют высокую эквивалентную добротность и дают колебания с малым содержанием гармоник. Однако их настройка сложнее рассмотренных нами генераторов и применяют их значительно реже.

При испытаниях радиоаппаратуры все более широкое применение находят генераторы прямоугольных импульсов. Это объясняется тем, что частотный спектр прямоугольных импульсов широк. Поэтому по виду импульса на выходе усилителя, например, можно сразу составить суждение о его частотной и фазовой характеристиках. Генераторами прямоугольных импульсов могут служить мультивибраторы или запускаемые синусоидальным напряжением триггеры. Триггер или иное формирующее устройство, например ограничитель, может быть добавлено к звуковому генератору.

На рис. 116 показана схема генератора прямоугольных импульсов, собранного на двух двойных триодах типа 6Н1П. Его частотный диапазон составляет 50 *гц* — 12 *кгц* (спектр генерируемых частот простирается примерно до 1 *Мгц*). Генератор состоит из мультивибратора (двойной триод $Л_1$), ограничителя (левый по схеме триод лампы $Л_2$) и катодного повторителя (правый триод лампы $Л_2$). Частота колебаний мультивибратора регулируется грубо переключателем *П* (переключением конденсаторов C_1 — C_1) и плавно линейным потенциометром R_3 (изменением положительного смещения на сетки лампы $Л_1$). Плавное перекрытие по частоте составляет примерно 1 : 5. Ширина импульсов (коэффициент заполнения) изменяется при помощи резистора R_1. Ограничитель улучшает форму импульсов, а катодный повторитель необходим для уменьшения выходного сопротивления генератора. Наибольшая амплитуда импульса 10 *в*.

Генераторы стандартных сигналов высокой частоты строятся по блок-схеме, показанной на рис. 117, *а*. Они включают в себя задающий генератор *ЗГ*, работающий в диапазоне частот 0,1—30 *Мгц*,

буферный усилитель-модулятор *У-М*, электронный вольтметр *V* для контроля уровня несущей частоты, аттенюатор *А*, генератор звуковой частоты *ГЗЧ* и измеритель коэффициента модуляции *m*, %.

Измерительные генераторы должны быть стабильны по частоте. Поэтому их собирают преимущественно на электронных лампах. В задающих генераторах применяют обычно трехточечные схемы с автотрансформаторной или емкостной связью. Эти генераторы обеспечивают непрерывное перекрытие диапазона частот порядка 3 : 1, причем чем выше частоты, тем меньше перекрытие. Для расширения частотного диапазона используют сменные катушки индуктивности.

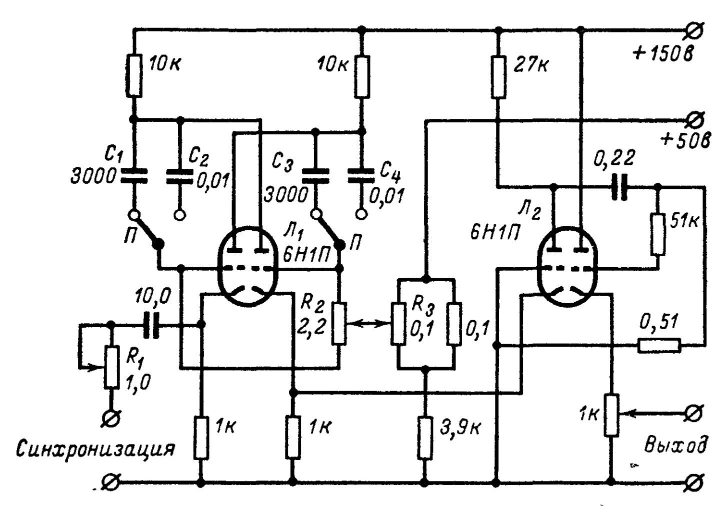


Рис. 116. Схема генератора прямоугольных импульсов.

Схема генератора с автотрансформаторной обратной связью приведена на рис. 117, *б*. Управляющая и экранирующая сетки лампы подключены к противоположным концам колебательного контура *LC* и напряжение между ними сдвинуто по фазе на 180°. Напряжение обратной связи определяется частью катушки контура, к которой подключены катод и экранирующая сетка лампы. Для возникновения генерации нужно, чтобы коэффициент усиления этой триодной части лампы $\mu \geqslant w_1^2/w_2^2$, где w_1 — число витков катушки, включенных между управляющей сеткой и катодом, а w_2 — число витков между катодом и экранирующей сеткой. Так как $w_2/w_1 = 0{,}25 \div 0{,}3$, то $\mu \geqslant 9 \div 16$. Частота колебаний генератора $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. Этих двух соотношений достаточно для приближенного расчета генератора. В зависимости от выбранных поддиапазонов и имеющегося конденсатора переменной емкости *С* параллельно и последовательно с ним могут быть включены подстроечные конденсаторы и конденсаторы постоянной емкости.

В рассматриваемом случае генератор собран на триодной части пентода, а нагрузка подключена к его аноду. Такую схему называют генератором с электронной связью с нагрузкой. Эта схема с электронной связью объединяет собой автогенератор и усилитель мощности, и изменения нагрузки в ней не оказывают заметного влияния

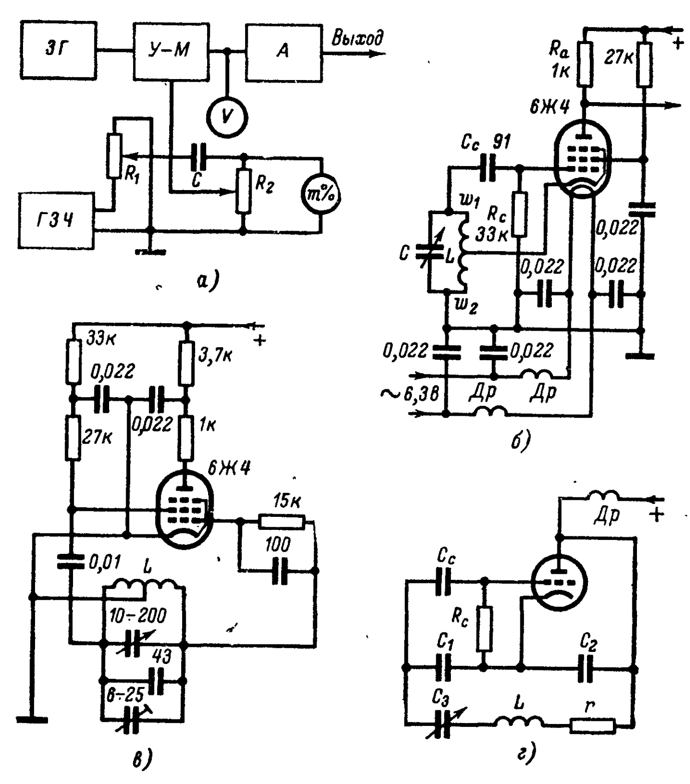


Рис. 117. Измерительные генераторы высокой частоты.

а — блок-схема генераторов стандартных сигналов; *б* — схема задающего генератора с автотрансформаторной обратной связью и электронной связью с нагрузкой; *в* — то же с включением контура между управляющей и экранирующей сетками лампы; *г* — схема задающего генератора с емкостной обратной связью и повышенной стабильностью частоты.

на частоту колебаний генератора. Резистор R_c и конденсатор C_c составляют цепь автоматического смещения на управляющей сетке лампы генератора, стабилизирующую амплитуду колебаний. При увеличении амплитуды среднее значение тока сетки возрастает, увеличивая смещение. В цепь накала лампы включены фильтры из конденсаторов и дросселей *Др*, препятствующие паразитной частот-

ной модуляции напряжения генератора частотой 50 *гц*, а также пролезанию высокого напряжения в другие каскады по цепи накала.

На рис. 117, *в* приведена трехточечная схема с автотрансформаторной связью, в которой колебательный контур включен между управляющей и экранирующей сетками пентода. По такой схеме построен, например, задающий генератор в широко известном генераторе стандартных сигналов типа Г4-1А (ГСС-6А). Достоинство этой схемы заключается в том, что катод лампы заземлен, что уменьшает паразитную частотную модуляцию.

На рис. 117, *г* показана схема трехточечного генератора с емкостной обратной связью и повышенной стабильностью частоты. Межэлектродные емкости лампы входят составной частью в полную емкость колебательного контура. При изменении режима лампы вследствие, например, изменения напряжений питания динамические междуэлектродные емкости меняются, что приводит к небольшим изменениям частоты колебаний. Влияние межэлектродных емкостей может быть сведено к минимуму подключением к ним внешних достаточно больших емкостей C_1 и C_2. Наибольшая емкость этих конденсаторов ограничивается значением коэффициента усиления лампы, который из условия возбуждения должен быть в этом случае

$$\mu \geqslant \frac{C_1}{C_2} + \frac{rR_i}{L}(C_1 + C_2),$$

где r — сопротивление потерь катушки в последовательной схеме замещения;

R_i — внутреннее сопротивление лампы.

Частота колебаний генератора

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{\dfrac{LC_3}{\dfrac{C_3}{C_1} + \dfrac{C_3}{C_2}\left(1 + \dfrac{r}{R_i}\right) + 1}}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_3}}.$$

Емкость контура определяется емкостью последовательно соединенных конденсаторов C_1, C_2 и C_3. Но емкость конденсаторов C_1 и C_2 может быть намного больше емкости конденсатора C_3. Тогда межэлектродные емкости составят лишь малые доли емкостей C_1 и C_2, а сами емкости этих конденсаторов частоту не определяют. Поэтому изменения межэлектродных емкостей лампы практически не влияют на частоту генератора.

В генераторах стандартных сигналов предусматривают внутреннюю и внешнюю амплитудные модуляции. Внутренняя модуляция производится напряжением одной (400 *гц*) или двух (400 и 1 000 *гц*) частот от встроенного звукового генератора. Модуляция осуществляется обычно в усилительном каскаде, собранном на пентоде типов 6Ж2П, 6К4П, 6К3 и т. п. В измерительном генераторе типа Г4-1А, например, усилитель собран на пентоде 6К3. На управляющую (первую) его сетку поступает напряжение несущей частоты от задающего генератора, а на экранирующую—напряжение от звукового генератора, собранного на лампе типа 6Н8С. Уровень выходного напряжения устанавливают изменением постоянного напряжения экранирующей сетки лампы усилительного каскада. При фиксированном уровне напряжения несущей частоты глубина модуляции

определяется амплитудой напряжения генератора звуковой частоты. Модулированное напряжение высокой частоты детектируется, и амплитудное значение низкочастотной переменной составляющей измеряется (амплитудным) вольтметром. Шкала его градуируется в значениях коэффициента амплитудной модуляции (m, %).

На выходе измерительных генераторов для согласования выхода с нагрузкой (например, с волновым сопротивлением кабеля) и для ослабления выходного напряжения (мощности) в определенное число раз ставят так называемые аттенюаторы (ослабители). Мы рассмотрим

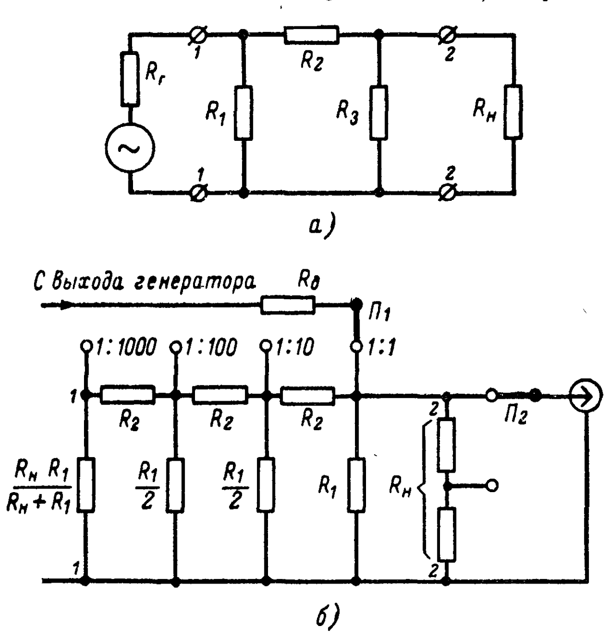


Рис. 118. Схемы аттенюаторов.

а — несимметричного П-образного; *б* — то же трехступенчатого.

только резисторные несимметричные П-образные аттенюаторы, применяемые в генераторах наиболее часто. В согласующем аттенюаторе цепь резисторов рассчитывается по отношению к выходному сопротивлению генератора $R_г$ и сопротивлению нагрузки $R_н$ так, чтобы входное сопротивление аттенюатора на его входных зажимах *1—1* при подключенном на выходе резисторе $R_н$ было равно сопротивлению $R_г$ (рис. 118, *а*). Точно так же сопротивление аттенюатора на выходных зажимах *2—2* при наличии $R_г$ равно сопротивлению $R_н$. Таким образом, в согласующих аттенюаторах согласование сопротивлений получается одновременно на входных и выходных зажимах, а это соответствует условиям максимальной отдачи мощности генератором и максимального ее поглощения нагрузкой.

Вследствие потерь в аттенюаторе каждому отношению $R_г/R_н$ соответствует свое наименьшее возможное отношение $K^2_{мин}$ (мощности на входе ослабителя к мощности на его выходе)

$$K^2_{мин} = \frac{2R_г}{R_н} - 1 + 2\sqrt{\frac{R_г}{R_н}\left(\frac{R_г}{R_н} - 1\right)}.$$

Следовательно, коэффициент K^2 ослабления мощности аттенюатором может быть установлен от $K^2_{мин}$ до бесконечности. Заметим, что если $R_г < R_н$, то в формулу подставляют не $R_г/R_н$, а $R_н/R_г$.

Сопротивления резисторов R_1, R_2 и R_3 П-образного несимметричного аттенюатора рассчитывают по следующим формулам:

$$R_1 = R_г \frac{K^2 - 1}{K^2 - 2K\sqrt{\frac{R_г}{R_н}} + 1}; \quad R_2 = \frac{\sqrt{R_г R_н}}{2} \frac{K^2 - 1}{K};$$

$$R_3 = R_н \frac{K^2 - 1}{K^2 - 2K\sqrt{\frac{R_г}{R_н}} + 1} = R_1 \frac{R_н}{R_г}.$$

Пусть, например, требуется согласовать выход генератора с нагрузкой при $R_г = 400$ *ом* и $R_н = 200$ *ом*. В этом случае $K^2_{мин} = 5{,}82$. Подставляя его в выражение для R_1, R_2 и R_3, найдем: $R_1 = 193$ *ком*, $R_2 = 282$ *ом* и $R_3 = 96{,}5$ *ком*.

В качестве примера рассчитаем еще аттенюатор для ослабления мощности на 20 *дб* при $R_г = 500$ *ом* и $R_н = 200$ *ом*. При ослаблении на 20 *дб* $K^2 = 100$. Подставляя его в выражение для R_1, R_2 и R_3 получим: $R_1 = 714$ *ом*, $R_2 = 1\,567$ *ом* и $R_3 = 224$ *ом*.

В измерительных генераторах обычно необходимо изменять выходное напряжение ступенями в отношении, например, 1 : 10 : 100 : 1 000, не меняя согласование сопротивлений. Для этого применяют ступенчатые аттенюаторы, собранные из П-образных секций (рис. 118, *б*). Нагрузкой аттенюатора $R_н$ может служить дополнительный делитель напряжения.

Ступенчатый аттенюатор питают от генератора тока, а это значит, что выходное сопротивление генератора должно быть велико по сравнению с входным сопротивлением аттенюатора. Поэтому между генератором и аттенюатором часто включают добавочный резистор $R_д$. На входе и выходе аттенюатора (точки *1—1* и *2—2*) внешние по отношению к нему резисторы берутся одинаковыми (применительно к рис. 118, *а* $R_н = R_г$), следовательно, для каждого П-образного звена аттенюатора $R_1 = R_3$. Но резистор R_3 предыдущего звена включен параллельно резистору R_1 последующего, и сопротивления резисторов аттенюатора поэтому получают значения, обозначенные на рис. 118, *б*. Резисторы R_1 и R_2 рассчитываются по тем же самым формулам (с учетом $R_г = R_н$). А какое же подставлять K для получения заданного ослабления напряжения? Если обе стороны аттенюатора нагружены на равные сопротивления, то коэффициент ослабления напряжения равен корню квадратному из коэффициента ослабления мощности. Значит, в приведенных выше формулах K означает для данного случая просто коэффициент ослабления напряжения.

Рассчитаем, например, аттенюатор к генератору стандартных сигналов Г4-1А (ГСС-6А) (см. рис. 118, *б*). Каждое из трех звеньев аттенюатора дает ослабление напряжения в 10 раз, т. е. $K = 10$, а сопротивление нагрузки $R_н = 80$ *ом*. При этом

$$R_1 = R_н \frac{K^2 - 1}{K^2 - 2K + 1} = 80 \frac{100 - 1}{100 - 20 + 1} = 97{,}6 \text{ ом};$$

$$R_2 = \frac{R_н}{2} \frac{K^2 - 1}{K} = \frac{80}{20} \frac{100 - 1}{10} = 396 \text{ ом}.$$

Сопротивление резистора между точками *1—1* должно быть $R_н R_1/(R_н + R_1) = 80 \cdot 97{,}6/177{,}6 = 44$ *ом*. В этом аттенюаторе сопротивление резистора $R_д = 360$ *ом*. Выходной делитель $R_н$ рассчитывается так же, как для вольтметров.

Все резисторы аттенюатора должны быть безындуктивными, так как они работают в широком спектре частот. Их монтируют непосредственно на переключателе, разделяя экранами.

Отсчетное устройство измерительного генератора состоит из шкалы и указателя. В простейшем случае шкалу укрепляют на передней панели *1*,

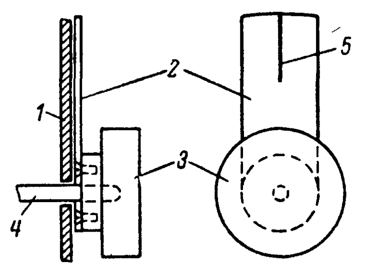


Рис. 119. Простейшее отсчетное устройство.

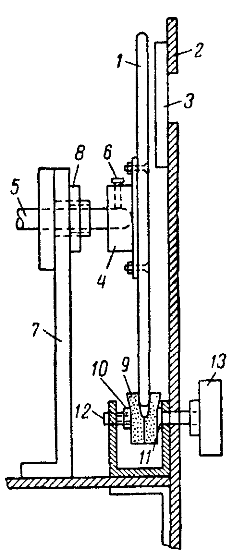


Рис. 120. Отсчетное устройство с механическим увеличением масштаба шкалы.

а указатель *2*, сделанный в виде пластины из органического стекла, прикрепляют двумя винтами к внутренней плоскости ручки настройки *3* (рис. 119). Ручка насаживается непосредственно на ось *4* конденсатора переменной емкости или сдвоенного потенциометра (в зависимости от того, что является элементом настройки генератора). На указателе (пластине) с обеих сторон наносят одну под другой риски *5*, совпадение которых с делениями шкалы и указывает отсчеты.

На рис. 120 показан чертеж более сложного отсчетного устройства, позволяющего устанавливать частоту генератора более плавно и точно. Шкалу наклеивают на металлический диск *1*, так что ее

отметки проходят при вращении диска мимо окна в передней панели *2*, закрытого пластиной *3* из органического стекла с нанесенными на нее рисками (пластину иногда делают в виде линзы). На диске укреплена втулка *4*, в которую входят ось *5* конденсатора или потенциометра настройки генератора. Положение диска на оси фиксируется стопорным винтом *6*. Сам конденсатор (или потенциометр) укреплен на стойке *7* гайкой *8*. Внизу диск зажат между двумя резиновыми шайбами *9*, которые поджимаются гайкой *10* к фиксирующей шайбе *11* и вращаются вместе с осью *12*, на выступающий конец которой надета ручка настройки *13*. При вращении ручки резиновые шайбы перемещают диск (его края закруглены) медленнее примерно во столько раз, во сколько диаметр диска больше диаметра резиновых шайб по месту касания диска.

33. Резонансные волномеры и гетеродинные индикаторы резонанса

Резонансный волномер представляет собой колебательный контур, состоящий из образцового конденсатора переменной емкости C_0, ряда сменных катушек индуктивности L, детектора $Д$ и индикаторного прибора μA, позволяющего отметить момент настройки волномера в резонанс с частотой f_x исследуемого источника колебаний (рис. 121). Для каждого диапазона частот, перекрываемого конденсатором при выбранной катушке, составляют градуировочные таблицы или графики, по которым определяют резонансную частоту контура в зависимости от угла поворота ротора конденсатора. Если диапазонов мало (два-три), то шкалу конденсатора удобно градуировать непосредственно в значениях частоты.

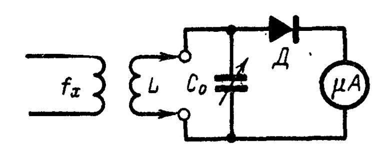


Рис. 121. Схема резонансного волномера.

Для измерения частоты резонансный волномер связывают с измеряемым генератором. Изменяя затем емкость образцового конденсатора, настраивают контур волномера в резонанс с генератором по наибольшему показанию индикатора волномера. После этого по отсчету на шкале конденсатора волномера и градуировочной таблице, соответствующей установленной катушке, находят измеряемую частоту.

Связь волномера с измеряемым генератором должна быть возможно более слабой, так как иначе может появиться ошибка вследствие явления затягивания. Для уменьшения погрешности частоту определяют дважды, устанавливая для этого резонанс один раз со стороны высших, а другой — со стороны низших частот. Измеряемую частоту получают как среднее из двух результатов.

Резонансным волномером, однако, можно контролировать только работающие генераторы, от которых и отбирается мощность, необходимая для отклонения указателя индикатора волномера. От этого недостатка свободен гетеродинный индикатор резонанса. Он состоит из настраиваемого генератора высокой частоты с индикаторным прибором (микроамперметром) в сеточной цепи лампы (рис. 122, *а*).

Катушки его, как и у резонансного волномера, сменные. При отключении анодного питания лампы им можно пользоваться как резонансным волномером.

При помощи гетеродинного индикатора резонанса можно измерять резонансную частоту колебательных контуров независимо от того, возбуждены они или нет. Если поднести катушку ГИРа L к невозбужденному измеряемому контуру и настроить его в резонанс с этим контуром, то последний будет отбирать от гетеродинного индикатора некоторую энергию и напряжение на катушке L понизится. Это вызовет уменьшение постоянной составляющей сеточного тока лампы, что и будет отмечено индикатором (микроамперметром).

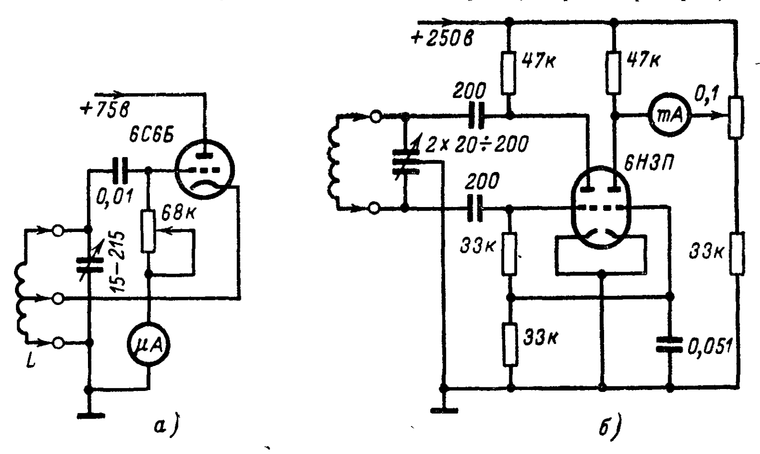


Рис. 122. Схемы гетеродинных индикаторов резонанса.

а — с автотрансформаторной связью; *б* — с емкостной связью.

При плавной перестройке частоты гетеродинного индикатора резонанс отмечается в виде резкого падения тока сетки. Если же измеряется частота возбужденного контура или другого источника колебаний, то совпадение частот гетеродинного индикатора и источника отмечается по резкому возрастанию сеточного тока. Отсчет берут в момент наибольшего уменьшения (увеличения) тока сетки. Очевидно, что характер изменения сеточного тока при настройке соответствует кривой избирательности измеряемого контура, что позволяет судить и о его добротности.

К гетеродинным индикаторам резонанса предъявляют в основном три требования: способность легко возбуждаться в широкой области частот, стабильность частоты колебаний и малые изменения амплитуды колебаний по частотному диапазону. Этому удовлетворяют трехточечные схемы с автотрансформаторной или емкостной связью. В первой из них катушки должны иметь дополнительный вывод, для второй же необходим дифференциальный конденсатор переменной емкости (рис. 122, *б*).

Катушки для частот до 1 *Мгц* можно наматывать внавал проводом ПЭЛ или ПЭЛШО 0,1—0,15, а катушки для частот до 20—

30 *Мгц* наматывают в один слой проводом ПЭЛ 0,25—0,3. Для более высоких частот применяют однослойные катушки из медного посеребренного провода диаметром 1—1,5 *мм*, намотанные с шагом 2—3 *мм*. Эти катушки удобно монтировать на октальных цоколях от негодных электронных ламп и включать (вставлять) их в ламповую панель, установленную на корпусе гетеродинного индикатора резонанса.

Для частот до 20—30 *Мгц* пригодны стандартные воздушные конденсаторы переменной емкости 20—500 *пф*. Для более же высоких частот необходим конденсатор с керамическими изоляторами на максимальную емкость до 50—80 *пф*.

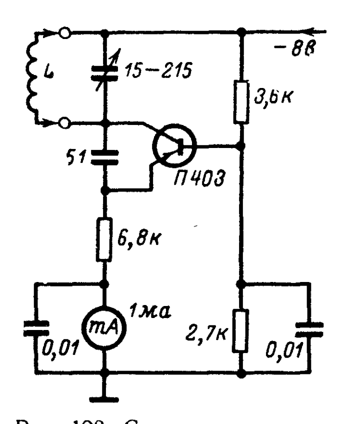


Рис. 123. Схема транзисторного гетеродинного индикатора резонанса.

Индикатором может служить микроамперметр на 200—500 *мка* или миллиамперметр (если имеется каскад усиления, как, например, в схеме на рис. 122, *б*). Можно предусмотреть регулировку чувствительности индикатора, но можно обойтись и без нее путем изменения расстояния между гетеродинным индикатором резонанса и измеряемой цепью.

Шкалу конденсатора можно градуировать либо непосредственно в частотах, либо в равномерных делениях, составив в последнем случае для каждого диапазона градуировочную таблицу или график. Для начального, приблизительного, определения частоты устанавливают сильную связь между контуром гетеродинного индикатора резонанса измеряемым контуром. Затем гетеродинный индикатор относят от объекта измерения и уточняют частоту. Если связь слишком сильная, то показания частоты получаются различными при настройке со стороны верхних и нижних частот. Чтобы исключить двузначность показаний, гетеродинный индикатор настраивают дважды, с обоих направлений, и берут среднее из этих двух показаний.

Гетеродинный индикатор резонанса, схема которого приведена на рис. 122, *а*, был изготовлен на два диапазона: 1,95—6,8 и 6—21,5 *Мгц*. Катушка первого диапазона намотана в один слой на каркасе из органического стекла диаметром 9 *мм* и состоит из 100 витков провода ПЭЛ 0,25 с отводом от 75-го витка (длина ее намотки 30 *мм*). Катушка второго диапазона, намотанная на таком же каркасе и таким же проводом, содержит 20 витков с отводом от 15-го витка.

На рис. 123 приведена схема простого транзисторного гетеродинного индикатора резонанса. Такой индикатор очень компактен по устройству и экономичен по питанию, но по стабильности частоты он несколько уступает ламповому гетеродинному индикатору резонанса. Постоянная составляющая эмиттерного тока его транзистора в диапазоне 2,7—6 *Мгц* изменяется примерно в пределах 25% (увеличивается с ростом частоты).

В заключение отметим, что гетеродинный индикатор резонанса при всей своей простоте является чрезвычайно универсальным прибором. Построив такой прибор, можно измерять частоту колебаний генераторов, резонансные частоты невозбужденных колебательных контуров и их добротность, индуктивности, взаимные индуктивности, емкости, напряженность электрического поля и многое другое.

34. Измерение низких и высоких частот

Для измерения низких частот от 10—20 *гц* до 100—200 *кгц* наиболее удобны электронные (конденсаторные) частотомеры с непосредственным отсчетом. Приведенная погрешность измерения частоты составляет у них 1—2,5%. В электронных частотомерах из положительных или отрицательных полуволн измеряемого напряжения формируются стандартные импульсы прямоугольной формы и измеряется средний ток заряда этими импульсами образцового конденсатора.

В ламповых частотомерах стандартизатором импульсов служит спусковое устройство с одним устойчивым состоянием (триггер Шмитта, заторможенный мультивибратор, ждущий блокинг-генератор и т. п.). При необходимости перед стандартизатором включают усилительный каскад и делитель. Со стандартизатора импульсы поступают в цепь, состоящую из конденсатора и диодов. Рассмотрим вначале наиболее общий случай так называемой диодной накопительной ячейки, применяемой в измерителях скорости счета импульсов, распределенных во времени неравномерно (рис. 124, *а*).

Обозначим амплитуду прямоугольного импульса, поступающего со стандартизатора, через U (обычно это 100 *в*). Пусть частоте их следования f *имп/сек* соответствует напряжение u на резисторе R (это может быть и сопротивление вольтметра). Пока выходное напряжение стандартизатора равно нулю, диод D_1 заперт напряжением u. Как только импульс превысит это значение, диод $Д_1$ отпирается и импульс напряжения $U - u$ заряжает последовательно соединенные конденсаторы C_1 и C_2. Один импульс оставляет на каждом конденсаторе заряд

$$q = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}(U - u) \approx C_1 (U - u),$$

так как всегда $C_1 \ll C_2$. Конденсатор C_1 разряжается задним фронтом импульса через диод D_2.

Заряд, поступающий на конденсатор C_2 в единицу времени,

$$Q = qf = C_1 f (U - u).$$

Такой же заряд в установившемся режиме должен стекать с конденсатора C_2 через резистор R, а заряд, протекающий в единицу времени, есть сила разрядного тока

$$Q = \frac{u}{R}.$$

Приравнивая правые части этих уравнений и решая их относительно u, получим:

$$u = \frac{RC_1 Uf}{1 + RC_1 f}.$$

Если $RC_1f \ll 1$ (это значит, что $U \gg u$), то шкала частотомера получается линейной

$$u = RC_1Uf.$$

При $U = 100$ *в* наибольшее значение *u* берут порядка 2 *в*.

Еще одно условие осуществления частотомера заключается в том, что конденсаторы за время, равное длительности импульса, должны успевать полностью заряжаться. Постоянная времени цепи заряда равна $(R + R_д + R_{вых})\, C_1C_2/(C_1 + C_2)$, где $R_д$ — сопротивление диода в прямом направлении, а $R_{вых}$ — выходное сопротивление стандартизатора. Так вот, эта постоянная времени должна быть

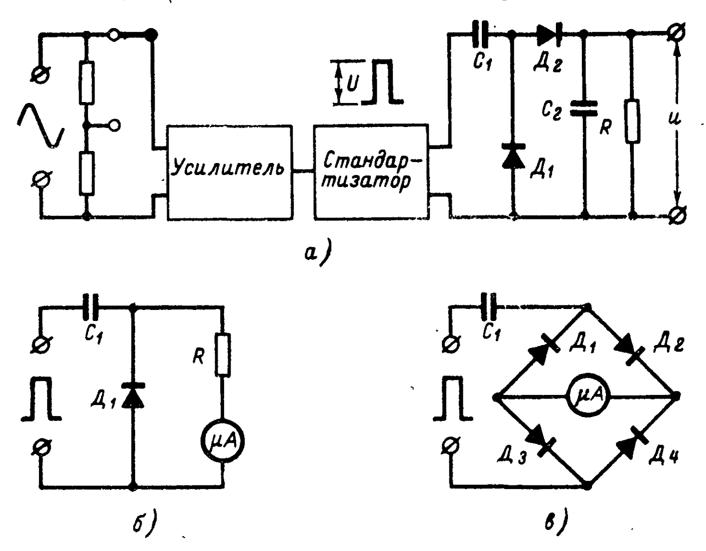


Рис. 124. Электронные частотомеры.

а — блок-схема измерителя скорости счета; *б* — ячейка для измерения среднего тока, *в* — ячейка с удвоением тока через индикатор.

по крайней мере в пять раз меньше длительности импульсов со стандартизатора, и если эта длительность равна половине периода измеряемых синусоидальных колебаний, то в десять раз меньше периода колебаний.

Из формулы для напряжения *u* (при $U \gg u$) видно, что пределы измерения можно менять переключением резисторов *R* или конденсаторов C_1, или того и другого. Отсюда видно также, что рассматриваемое устройство может служить измерителем емкости, причем шкала этого измерителя линейна.

Конденсатор C_2 служит исключительно для уменьшения статистических погрешностей отсчетов при измерении импульсов, распределенных во времени случайно. При измерении только периодических сигналов его можно исключить. Диод D_2 тоже можно исключить из схемы.

Напряжение u измеряют электронным вольтметром. Но вместо него можно измерять ток через резистор: $i = u/R = C_1Uf$. Для этого последовательно с резистором R включают микроамперметр μA (рис. 124, *б*).

Микроамперметр включают и в мостовую схему (рис. 124, *в*). При этом через него протекают и ток заряда конденсатора и ток его разряда, т. е. значение тока через микроамперметр удваивается: $i = 2fC_1U$.

Если в схеме частотомера используются электровакуумные диоды D_1 и D_2 (например, двойной диод типа 6Х2П), то для устранения влияния начального тока диодов анод диода D_2 подключают не к заземленной точке, а к точке с потенциалом минус 1—2 *в*. При отсутствии отрицательного напряжения полярность включения диодов можно изменить на обратную и тогда на катод диода D_2 надо подать напряжение плюс 1—2 *в*.

Транзисторный частотомер можно построить по схеме, аналогичной ламповой. Однако особенности транзисторов позволяют несколько отойти от схемы на лампах в сторону ее упрощения. Коллекторный ток транзистора с проводимостью типа $p = n = p$ при положительной его базе мал, поэтому напряжение на коллекторе практически равно напряжению источника питания. При отрицательной базе, когда транзистор насыщен, напряжение между эмиттером и коллектором незначительно по сравнению с напряжением источника питания. Поэтому в транзисторных частотомерах формирование прямоугольных импульсов (стандартизация) осуществляется обычно в одном из последовательных каскадов усилителя, работающем в качестве ограничителя. Измерительный конденсатор практически заряжается до напряжения батареи питания и вновь полностью разряжается.

Схема транзисторного частотомера приведена на рис. 125. На входе его установлен делитель напряжения на 0,3—3 *в* (сопротивление входа 100 *ком*) при положении *1* переключателя $П_1$ и на входное напряжение более 3 *в* (сопротивление входа 1 *Мом*) при положении *2* этого переключателя. Диоды $Д_1$ и $Д_2$ образуют двусторонний ограничитель входного напряжения. Затем следуют три каскада усиления на транзисторах $T_1 - T_3$ и ограничительный каскад на транзисторе T_4. Диод $Д_3$ предотвращает заряд разделительного конденсатора на входе ограничительного каскада. Сопротивление цепи этого диода примерно равно сопротивлению участка эмиттер—база отпертого транзистора T_4.

Измерительные конденсаторы выбраны для пределов измерения до 100 *гц*, 300 *гц*, 1 *кгц*, 3 *кгц*, 10 *кгц* и 30 *кгц*. На одном из этих пределов с установленным измерительным конденсатором производят калибровку по известной частоте путем шунтирования микроамперметра μA сопротивлением резистора R_1. Для других пределов емкости измерительных конденсаторов подбирают с таким же отношением, как и пределы измерения. Например, если на пределе 100 *гц* (калибруем по частоте электросети 50 *гц*, если нет более точного образцового генератора) емкость измерительного конденсатора равна 390 *пф*, то для других пределов подбирают конденсаторы емкостью 1 170 *пф* (выбирают из нескольких конденсаторов с номинальной емкостью 1 000 *пф* и допуском ±20% наиболее подходящий или же составляют необходимую емкость из нескольких параллельно включенных конденсаторов), 3 900 *пф*, 0,0117 *мф*, 0,039 *мф* и 0,177 *мф*.

Если же имеется образцовый генератор, а нет возможности достаточно точно измерить емкость, то нужно добавить еще одну плату к переключателю $П_2$ и снабдить микроамперметр набором шунтов, переключаемых одновременно с переключением измерительных конденсаторов.

Пределы измерения частотомера зависят от напряжения питания. Поэтому для контроля напряжения микроамперметр может быть подключен переключателем $П_3$ к резистору R_2, вместе с которым он образует вольтметр, измеряющий напряжение источника питания.

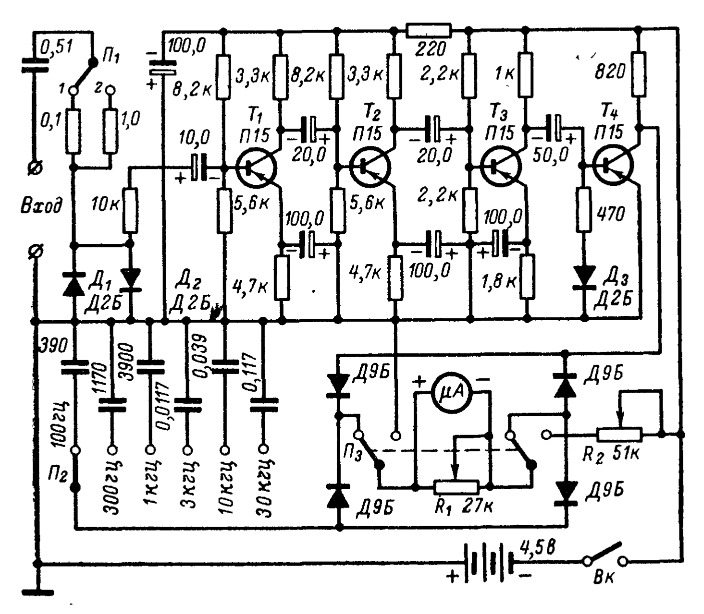


Рис. 125. Схема транзисторного частотомера.

Одним из наиболее точных методов измерения частоты (от низкой до высокой) является метод биений. Напряжение неизвестной частоты и напряжение от измерительного генератора с плавной настройкой подводятся к смесителю. Регулируя (изменяя) частоту измерительного генератора, добиваются получения нулевых биений. Это имеет место при равенстве частот измеряемого источника и измерительного генератора. Указателем биений может быть телефон, осциллограф, электронно-световой индикатор настройки и др.

Схема прибора с указателем нулевых биений приведена на рис. 126. Напряжения с амплитудным значением около 1 *в* измеряемой f_x и образцовой f_0 (от измерительного генератора) частот подаются на первую и третью сетки лампы $Л_1$ смесительного каскада. С выхода этого каскада напряжение разностной частоты $f_x - f_0$ (биений) усиливается лампой $Л_2$ и поступает затем на детектор $Д_2$. Уровень напряжения биений регулируют потенциометром R_1.

Индикатором биений служит лампа $Л_3$ типа 6Е1П (электронно-световой индикатор настройки).

При показанной на схеме полярности включения детектирующего диода $Д_2$ на сетку индикаторной лампы $Л_3$ поступают отрицательные полуволны напряжения биений. Постоянная времени цепи R_2C_1 составляет примерно 1 *мсек*. Поэтому при большой разности частот f_x и f_0 на экране индикаторной лампы наблюдается узкий световой сектор (на сетке этой лампы постоянное отрицательное напряжение). По мере приближения частоты f_x к частоте f_0 световой сектор расширяется, а при небольшой их разности он начинает пульсировать с частотой биений. При равенстве частот f_x и f_0 сектор превращается в узкую светлую линию.

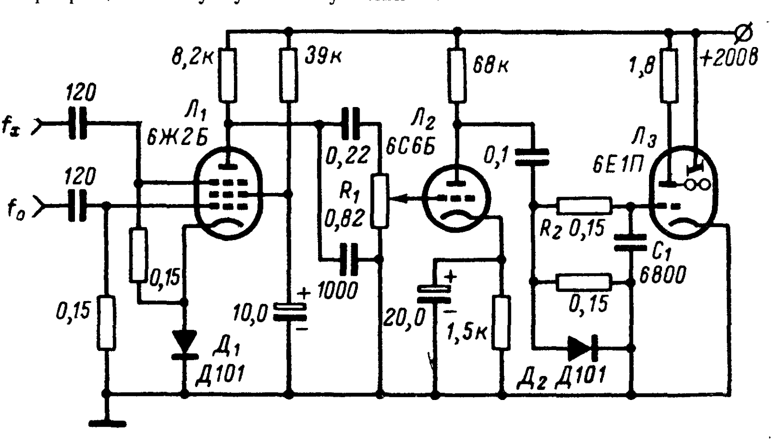


Рис. 126. Схема прибора с указателем нулевых биений.

Этим прибором можно измерять частоту от десятков килогерц до сотен мегагерц. Измерение частоты производят дважды: один раз, подходя к частоте f_x со стороны высоких, а другой — со стороны низких частот. За значение f_x принимают полусумму полученных двух значений частоты на шкале измерительного генератора.

Для измерения частот в очень широкой области (до нескольких сотен мегагерц) могут применяться гетеродинные индикаторы резонанса. На метровых волнах легко произвести непосредственное измерение длины волны, используя для этого явление стоячих волн в линиях. Такие линии называют измерительными. Чаще всего пользуются наиболее простой двухпроводной линией, пригодной для частот от 100 до 1 000 *Мгц*. Настройку линии в резонанс осуществляют передвижением перемычки, замыкающей линию накоротко. Длина измерительной линии должна быть не менее длины волны λ. На частоте 100 *Мгц*, например, линия не должна быть короче 3 *м*.

Измерительная линия состоит из двух проводов (лучше из медных трубок), натянутых горизонтально на расстоянии $0{,}02\lambda$ или меньше один от другого. Провода укрепляют на изоляторах, а чтобы они не провисали, их натягивают пружинами или грузами

(через изоляторы). Для настройки линии по ней передвигают медную перемычку (мостик). В такой короткозамкнутой линии при питании ее от генератора возникает стоячая волна, причем на короткозамкнутом участке линии (в месте установки перемычки) находится пучность тока (он максимален) и узел напряжения (оно равно нулю).

Линию соединяют с генератором через катушку или виток связи (связь должна быть слабой). Передвигая перемычку от катушки связи к концу линии (рис. 127), настраивают последнюю в резонанс с частотой генератора. Индикатором резонанса могут служить включенные в перемычку термоэлектрический миллиамперметр *mA* или

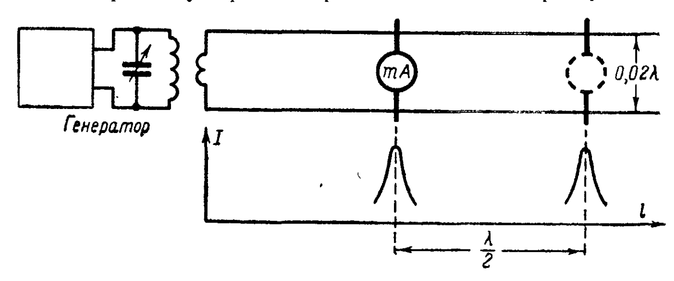


Рис. 127. Измерение частоты (длины волны) при помощи измерительной линии.

лампочка накаливания (при резонансе лампочка светит наиболее ярко). Передвигая далее перемычку по направлению к концу линии, находят следующий резонанс. Он наступает, когда перемычка передвинута относительно первого резонанса на половину длины волны $\lambda/2$. Следовательно, длина волны равна удвоенному расстоянию между двумя соседними положениями перемычки, дающими настройку линии в резонанс.

Распределение стоячей волны вдоль линии можно определить и при помощи неоновой лампы, перемещаемой вдоль линии. Наиболее точным индикатором является детекторный вольтметр, связываемый с линией витком связи. Последний можно располагать как перпендикулярно (емкостная связь), так и параллельно (индуктивная связь) проводам линии. При измерении длины волны в линии резонансным методом индикатор можно включить в цепь генератора. О настройке линии в резонанс судят при этом по максимальной отдаче мощности генератором.

35. Электронный осциллограф и его применение

Электронный осциллограф является чрезвычайно полезным и универсальным измерительным прибором. Одно из главных его достоинств заключается в том, что он позволяет непосредственно наблюдать на экране электроннолучевой трубки форму исследуемого электрического процесса.

Основу осциллографа составляет электроннолучевая трубка с электростатическим управлением электронного пучка. Трубка

содержит источник электронов, систему электродов для создания и формирования электронного пучка, измерительный механизм в виде отклоняющих пластин и флуоресцирующий экран, на котором наблюдают исследуемый процесс. Схематическое устройство трубки показано на рис. 128.

Источником электронов служит подогревный катод *К*. Он окружен цилиндрическим электродом *М* с отверстием в дне. Этот электрод называется модулятором и служит для регулировки яркости светящегося на экране пятна. На модулятор подают отрицательное по отношению к катоду напряжение и, регулируя его,

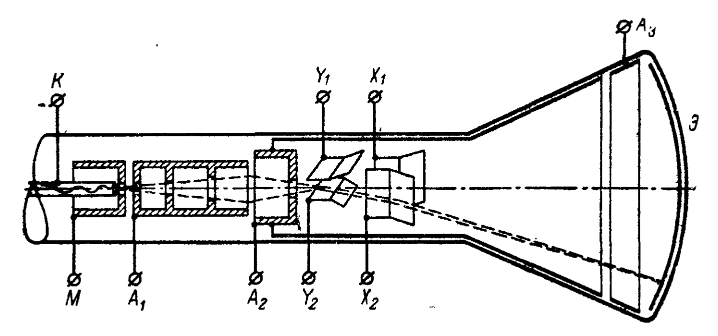


Рис. 128. Устройство электроннолучевой трубки.

изменяют яркость пятна. Следующий электрод A_1 является фокусирующим. Его называют также первым анодом. Регулируя на нем положительное (относительно катода) напряжение, сводят электронный пучок у экрана трубки в небольшую точку. На второй анод A_2, который называется ускоряющим, подают высокое, в несколько киловольт, положительное напряжение. Чем больше ускоряющее напряжение, тем выше яркость пятна (вследствие увеличения энергии электронов в пучке), но тем меньше чувствительность трубки, так как для отклонения быстрых электронов нужно приложить к ее пластинам большее напряжение. Для сохранения чувствительности в некоторых трубках применяют дополнительный ускоряющий анод A_3, расположенный вблизи экрана *Э* и воздействующий на поток электронов после прохождения им отклоняющих пластин. Экран трубки покрыт специальным веществом (люминофором), светящимся при бомбардировке его электронами.

На фокусировку электронного луча влияют электрические поля, образуемые попадающими на стекло трубки вторичными электронами, выбиваемыми из ее экрана. Для устранения этого внутреннюю поверхность баллона трубки покрывают проводящим слоем графита, который электрически соединяют со вторым анодом. От внешних электрических и магнитных полей трубку защищают, помещая ее в экранирующий цилиндр из мягкой стали.

Питание на трубку подают от выпрямителя через общий делитель напряжения. Ручки потенциометров, движки которых соединены с модулятором и первым анодом, выводят на переднюю панель осциллографа и обозначают их как «яркость» и «фокусировка».

Измерительный механизм трубки состоит из двух пар отклоняющих пластин, расположенных на пути электронного пучка перпендикулярно друг другу. Пара пластин Y_1 и Y_2 (пластины вертикального отклонения), расположенных ближе к катоду трубки, отклоняет электронный пучок сильнее. На эти пластины подают исследуемый сигнал. На другую пару пластин X_1 и X_2 (пластины горизонтального отклонения) подают линейно меняющееся напряжение, называемое напряжением развертки, которое обеспечивает равномерное движение электронного пучка в горизонтальном направлении и дает возможность наблюдать на экране трубки форму кривой исследуемого напряжения.

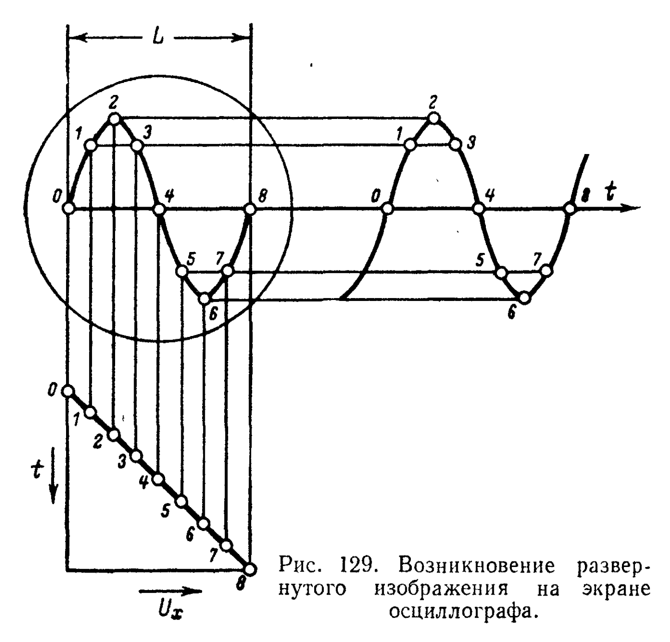


Рис. 129. Возникновение развернутого изображения на экране осциллографа.

Чтобы пояснить возникновение изображения на экране трубки при одновременном вертикальном и горизонтальном отклонениях луча, рассмотрим один период развертки, который разделен на 8 отрезков, как это изображено на рис. 129. Здесь справа представлен график исследуемого напряжения U_x за время t, несколько большее одного периода, а внизу показано изменение напряжения (развертка) на горизонтальных отклоняющих пластинах (ось времени здесь направлена вниз).

Проведем от отдельных точек графика напряжения развертки до экрана вертикальные, а от соответствующих мгновенных значений исследуемого процесса горизонтальные линии. В результате в каждой точке пересечения этих линий мы получим положение пучка на экране в данный момент времени. Мы приняли при построении графика, что длительность развертки точно равна периоду иссле-

дуемого сигнала. Если длительность развертки увеличить в 2 раза, то на том же отрезке экрана длиной L уложатся два периода, а если уменьшить ее вдвое, то половина периода и т. п.

Получить хорошо видимое изображение периодических процессов можно только при периодическом повторении развертки и при условии, что развертка охватывает каждый раз один или несколько полных периодов исследуемого процесса. Для этого в генераторах развертки предусматривают цепи синхронизации развертки исследуемым процессом. Того же самого можно добиться, если напряжение развертки будет начинаться при точно установленном значении исследуемого напряжения. Это так называемая ждущая развертка. Она применяется преимущественно при наблюдении периодических импульсных сигналов.

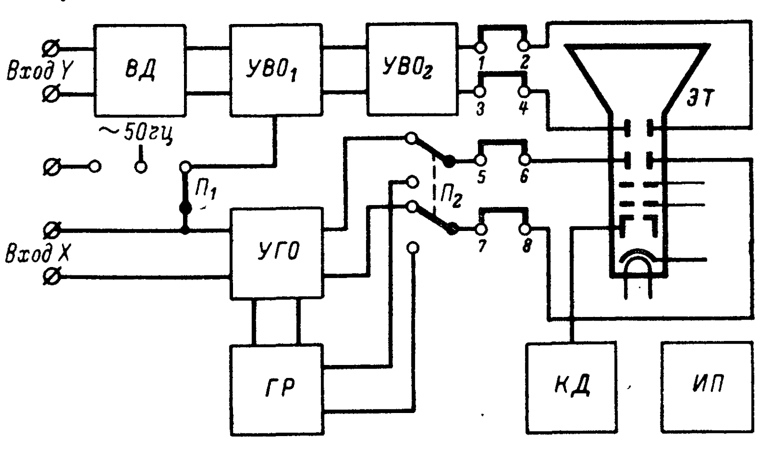


Рис. 130. Блок-схема осциллографа.

Напряжение развертки имеет пилообразную форму. Сначала оно должно линейно увеличиваться до определенной величины, а затем возможно быстрее спадать до нуля. Этот процесс повторяется регулярно через определенные промежутки времени. Линейно меняющееся во времени напряжение получают, заряжая (или разряжая) конденсатор током постоянной величины. Обратный ход электронного пучка гасится подачей на модулятор отрицательного импульса.

Чувствительность электроннолучевых трубок обычно не превышает 0,1—0,4 *мм/в* и, следовательно, непосредственно с помощью трубок можно исследовать напряжения с амплитудой 150—200 *в*. Поэтому почти во всех осциллографах исследуемое напряжение предварительно усиливается усилителем вертикального отклонения и уже затем подается на отклоняющие пластины.

Типовая блок-схема осциллографа показана на рис. 130. Она содержит входной делитель (или аттенюатор) *ВД*, усилители вертикального отклонения $УВО_1$ и $УВО_2$, усилитель горизонтального отклонения *УГО*, генератор развертки *ГР*, калибратор длительности

(генератор меток времени) *КД*, источник питания *ИП* и электронно-лучевую трубку *ЭТ*.

Входной делитель выполняют обычно частотнонезависимым, двухступенчатым или трехступенчатым с коэффициентами деления 1, 0,1 и 0,01. С делителя сигнал поступает на усилитель $УВО_1$ (катодный повторитель), нагрузкой которого служит потенциометр, позволяющий плавно регулировать коэффициент усиления тракта. Затем следует основной усилитель $УВО_2$. Так как большинство трубок имеет симметричное отклонение, выходной каскад этого усилителя выполняется парафазным. Для расширения полосы пропускания усилителя применяется частотная коррекция. Исследуемый сигнал можно подать на пластины и непосредственно, минуя усилитель. Для этого служат гнезда *2* и *4*, которые соединены съемными перемычками с гнездами *1* и *3*.

В импульсных осциллографах катодный повторитель работает на линию задержки, которая задерживает исследуемый импульс на время (0,25 *мксек*), необходимое для запуска ждущей развертки. Без такой задержки передний фронт крутого импульса нельзя было бы увидеть, так как развертка всегда немного опаздывает из-за переходных процессов.

Переключатель $П_1$ служит для выбора вида синхронизации генератора развертки *ГР*. Усилитель горизонтального отклонения *УГО* является одновременно и усилителем синхронизации. Имеется три вида синхронизации: 1) внутренняя синхронизация исследуемым процессом с выхода усилителя $УВО_1$, 2) синхронизация напряжением электросети 50 *гц*, что удобно при исследовании цепей, питаемых током промышленной частоты, и 3) внешняя синхронизация от внешних генераторов.

В ряде случаев, например при измерении частоты, удобно иметь не линейную, а синусоидальную развертку. Для этого предусматривается возможность подключения (переключателем $П_2$) пластин горизонтального отклонения трубки непосредственно к выходу усилителя горизонтального отклонения *УГО*, на вход которого подают напряжение требуемого вида. В некоторых осциллографах напряжение линейной развертки подается на пластины также через усилитель.

Почти все осциллографы имеют калибратор длительности (генератор меток времени) *КД*. Он дает отрицательные импульсы известной частоты следования, которые поступают на модулятор трубки и модулируют яркость изображения (кривой) на экране. На кривой появляются темные точки (пучок заперт), расстояние между которыми соответствует периоду колебаний генератора меток. В осциллографах могут быть и другие вспомогательные узлы (калибраторы амплитуды, коммутаторы для одновременного наблюдения нескольких процессов и т. п.).

Осциллографы — довольно сложные и дорогие приборы, что, конечно, препятствовало их широкому применению в радиолюбительской практике. В настоящее время промышленность выпускает осциллограф типа ЛО-70 специально для радиолюбителей. Он собран на трех лампах (6Ж5П, 6Н1П и 6П15П) и трубке ЛО-247 с диаметром экрана 70 *мм*. Этот осциллограф имеет следующие данные: чувствительность вертикального отклонения на частоте 1 *кгц* не менее 40 *мм/в*, неравномерность частотной характеристики ±3 *дб* в полосе частот 25 *гц* — 200 *кгц* и ±5 *дб* в полосе частот

20 *гц* — 1 *Мгц*, входное сопротивление усилителя 100 *ком* и 1 *Мом*, входная емкость 25—30 *пф*, коэффициент нелинейных искажений не более 5%. Генератор развертки работает в диапазоне частот 10 *гц* — 80 *кгц*, который разбит на 9 поддиапазонов: 10—30 *гц*, 25—65 *гц*, 60—220 *гц*, 200—620 *гц*, 520 *гц* — 2 *кгц*, 1,5—6,5 *кгц*, 6,4—15 *кгц*, 14—39 *кгц* и 36—80 *кгц* (на первом и последнем поддиапазонах линейность развертки не гарантируется). Осциллограф питается от электросети и потребляет мощность около 50 *вт*. Его размеры 275×185×120 *мм*, а вес 5,5 *кг*.

Принципиальная схема осциллографа ЛО-70 показана на рис. 131. Усилитель вертикального отклонения собран на лампе $Л_1$. Исследуемое напряжение поступает на вход осциллографа через специальное гнездо $Г_2$, которое одновременно служит и переключателем входного сопротивления. При полном (глубоком) включении вилки в это гнездо потенциометр R_1 («регулировка усиления») отключается и входное сопротивление составляет около 1 *Мом*. Высоту изображения на экране электроннолучевой трубки в этом случае можно регулировать при помощи внешнего делителя напряжения (аттенюатора) с коэффициентами деления 1 : 1, 1 : 3 и 1 : 10, который входит в комплект осциллографа. При неполном включении вилки входное сопротивление уменьшается до 100 *ком* и усиление можно регулировать потенциометром R_1.

С анода лампы $Л_1$ сигнал поступает на фазоинвертор, собранный на левом (по схеме) триоде лампы $Л_2$. С анода и катода этого триода симметричное напряжение сигнала подается на пластины вертикального отклонения электроннолучевой трубки $Л_4$.

Генератор развертки выполнен по транзитронной схеме на лампе $Л_3$. Включение того или иного поддиапазона частоты развертки производится переключателем *П*. В пределах каждого поддиапазона плавная регулировка частоты развертки осуществляется изменением напряжения смещения управляющей сетки лампы $Л_3$ при помощи потенциометра R_{47}. Резисторы R_{46} и R_{48} ограничивают диапазон изменения частоты.

При внутренней синхронизации напряжение синхронизации снимается с анода лампы $Л_1$ через резистор R_{12}. Для коррекции частотной характеристики цепи синхронизации в области высоких частот (200—500 *кгц*) параллельно этому резистору включена цепь из конденсатора C_8 и резистора R_{17}. Далее сигнал синхронизации через конденсатор C_1 и потенциометр R_{22} поступает в цепь защитной сетки лампы $Л_3$ генератора развертки. Напряжение внешней синхронизации подается на гнезда $Г_4$ и $Г_3$. При включении вилки в эти гнезда цепь внутренней синхронизации отключается. Уровень синхронизации в обоих случаях регулируют потенциометром R_{22}.

С анода лампы $Л_3$ через разделительный конденсатор C_{21} пилообразное напряжение поступает на сетку правого триода лампы фазоинвертора $Л_2$. С анодной R_{40} и катодной $R_{39}R_{41}$ нагрузок этого триода симметричный сигнал через конденсаторы C_{19} и C_{20} подается на пластины горизонтального отклонения трубки. Чтобы добиться большей симметрии отклонения, монтажные и междуэлектродные емкости, шунтирующие нагрузки, выравнены.

Импульс гашения обратного хода электронного луча образуется в цепи экранирующей сетки лампы $Л_3$ на резисторе R_{50} и через конденсатор C_{18} поступает на модулятор электроннолучевой трубки. Питающее напряжение подается на электроды трубки с делителей

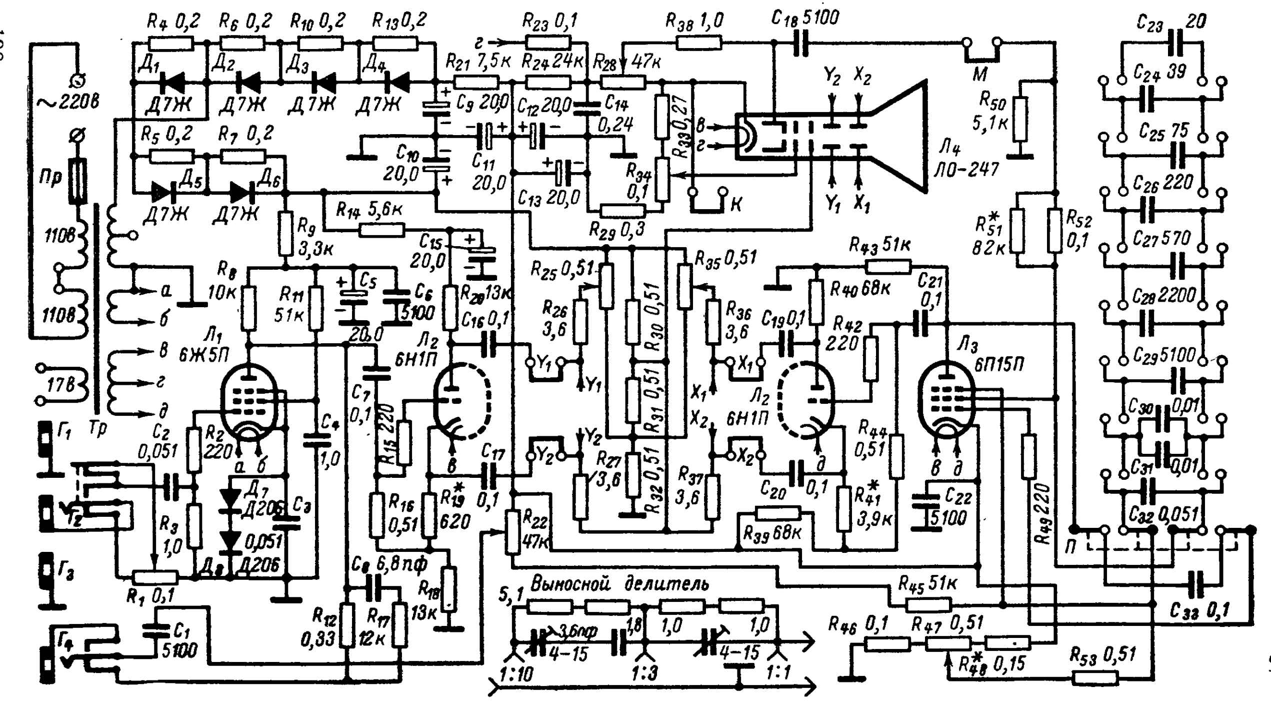


Рис. 131. Схема осциллографа типа ЛО-70.

$R_{28}R_{33}R_{34}R_{29}$ и $R_{25}R_{30}R_{31}R_{32}R_{35}$. Ускоряющее напряжение снимается с потенциометра R_{34}, который служит для фокусировки. Потенциометром R_{28}, изменяя смещение на модуляторе, регулируют яркость свечения трубки. Смещать электронный пучок по вертикали и по горизонтали можно при помощи потенциометров R_{25} и R_{35}.

Конструкция осциллографа предусматривает подачу исследуемого напряжения непосредственно на пластины электроннолучевой трубки. Для этого на задней стенке прибора имеется колодка с шестью парами гнезд, в которые вставлены шесть вилок-перемычек. Усилитель или генератор развертки можно отключить от трубки, удалив соответствующие вилки-перемычки. Кроме того, электронный луч можно модулировать от внешнего источника. Для этого на верхние гнезда колодки выведены катод и модулятор трубки.

Возможности промышленных лабораторных осциллографов для различных исследований намного выше, чем у осциллографа ЛО-70; в частности, они позволяют достаточно полно исследовать импульсные сигналы. Для этого они рассчитаны на более широкую полосу пропускания усилителей и ждущий режим работы генератора развертки. Например, у осциллографа типа С1-3 (ИО-4), применяемого при разработке импульсной и телевизионной аппаратуры, усилитель вертикального отклонения имеет полосу пропускания на уровне 0,7 от 20 *гц* до 6 *Мгц*. Чувствительность его канала вертикального отклонения не ниже 150 *мм/в*. Генератор развертки осциллографа С1-3 работает в автоколебательном и ждущем режимах в диапазоне длительностей от 1 до 700 *мксек*. Осциллограф имеет яркостные калиброванные метки с периодом следования 0,1 *мксек*, 1 *мксек*, 10 *мксек*, 100 *мксек* и 1 *мсек* (стабильность меток не ниже 5%). В нем имеется потенциометр, позволяющий измерять амплитуды импульсов и постоянные уровни напряжения в диапазоне 10—400 *в* с погрешностью не более ±5%.

В заключение рассмотрим некоторые применения осциллографов в измерительной технике.

Осциллограф широко применяется, например, для измерения частоты и сдвига фаз между двумя синусоидальными колебаниями. Измерение частоты производится путем точного сравнения неизвестной частоты с образцовой частотой. Это сравнение может быть выполнено различными способами. Здесь мы рассмотрим сравнение частот и измерение разности фаз двух синусоидальных колебаний по фигурам Лиссажу.

Подадим на одну пару пластин электроннолучевой трубки (непосредственно или через усилитель) исследуемое напряжение U_x неизвестной частоты f_x, а на другую пару пластин напряжение U_0 от образцового генератора с частотой f_0. Электронный луч под влиянием этих напряжений будет вычерчивать на экране трубки изображения, известные под названием фигур Лиссажу. Если частоты обоих напряжений относятся как целые числа, то фигуры Лиссажу на экране будут неподвижными. По их виду можно определить отношение частот и разность фаз напряжений.

На рис. 132 построены фигуры Лиссажу для нескольких различных соотношений частот и фаз колебаний. В нижней левой части рисунка показано напряжение на пластинах горизонтального отклонения X_1X_2. Пусть это будет напряжение U_0 от образцового генератора. Справа показаны исследуемые напряжения U_x, поступающие на пластины вертикального отклонения Y_1Y_2. Предположим, что

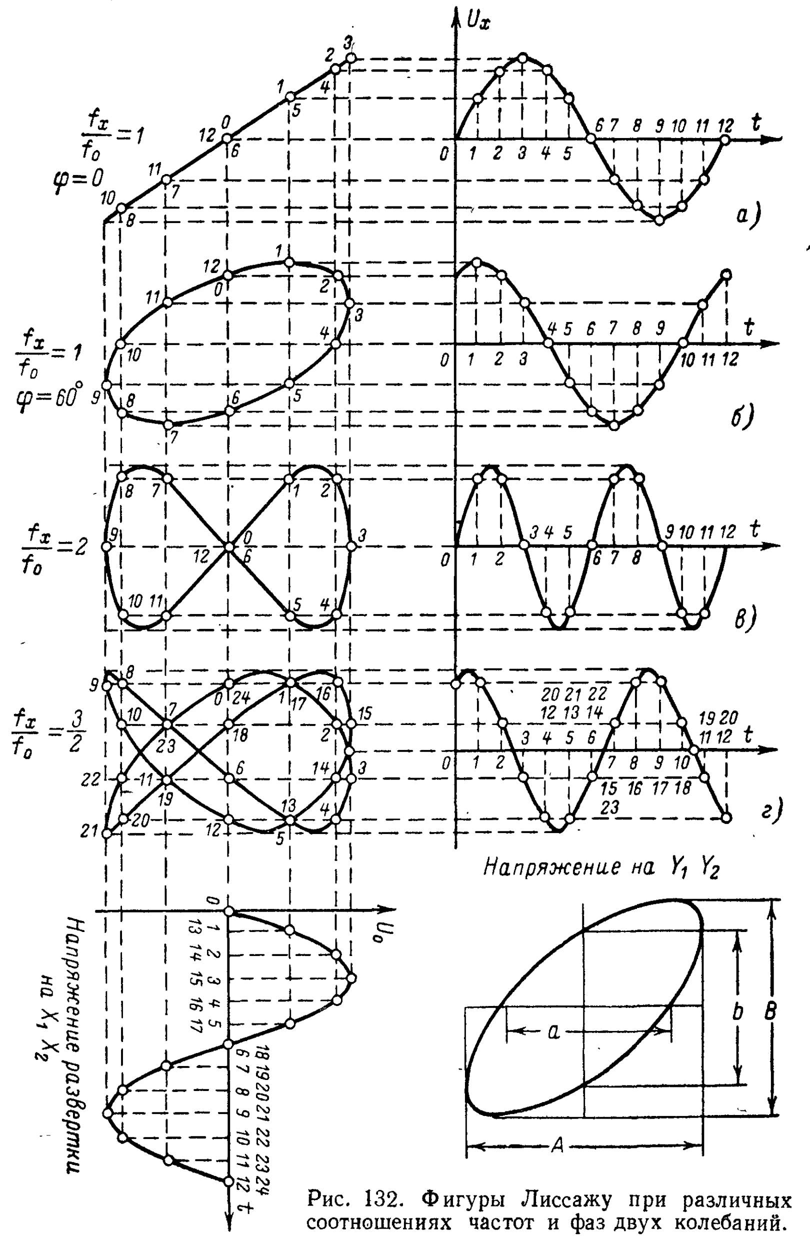


Рис. 132. Фигуры Лиссажу при различных соотношениях частот и фаз двух колебаний.

а — при одинаковых частотах и фазах; *б* — при одинаковых частотах, но различающихся на 60° фазах; *в* — при отношениях частот 2 : 1; *г* — при отношениях частот 3 : 2.

амплитуды обоих колебаний равны. Это всегда можно сделать, регулируя чувствительность осциллографа по одному из каналов. Тогда по мере увеличения сдвига фаз между напряжениями прямая на экране трубки (рис. 132, *а*) начнет превращаться в постепенно расширяющийся эллипс (рис. 132, *б*), большая ось которого (первоначальная прямая) будет постепенно приближаться к вертикали. При угле сдвига фаз $\varphi = 90°$ эллипс превратится в окружность. При дальнейшем увеличении угла сдвига фаз эллипс будет продолжать поворачиваться влево, одновременно сужаясь по малой оси, и при $\varphi = 180°$ он превратится вновь в прямую, но уже идущую слева вниз направо. При изменении угла от 180 до 360° картина повторяется

Фазовый угол определяется по отношению длины пересекающей эллипс координаты (абсциссы или ординаты) к длине проекции оси эллипса на соответствующую координату. Для ясности в правой нижней части рисунка изображен эллипс отдельно с необходимыми обозначениями, в соответствии с которыми

$$\sin\varphi = \frac{a}{A} = \frac{b}{B}.$$

Отсюда по таблице синусов находят и сам угол φ. При этом определении необходимо предварительно убедиться, что вносимые усилителями осциллографа фазовые сдвиги по меньше мере одинаковы, в противном же случае их нужно либо скомпенсировать, либо учесть.

Значение угла φ дает разность фаз между двумя напряжениями. Чтобы найти, какое напряжение отстает, а какое опережает, нужно исследуемое напряжение с неизвестным фазовым углом подвести к осциллографу через фазосдвигающую цепь, направление сдвига фаз которой известно, например через дифференцирующую *RC*-цепь, дающую опережение. Если при этом эллипс на экране трубки расширяется, значит фазовый сдвиг у неизвестного напряжения того же характера, что и у фазосдвигающей цепи, т. е. при дифференцирующей цепи исследуемое напряжение опережает образцовое напряжение.

Перейдем теперь к измерению частоты. Ее определяют по неподвижной фигуре на экране трубки следующим образом. Мысленно вписывают фигуру в прямоугольник так, чтобы петли фигуры касались его сторон. Число точек касания фигурой перпендикулярных сторон прямоугольника дает отношение частот напряжений, отклоняющих электронный луч по этим направлениям. Для иллюстрации на рис. 132, *в* выполнено построение фигуры для случая, когда частота неизвестного напряжения f_x превышает частоту образцового f_0 вдвое, а на рис. 132, *г* — когда отношение этих частот $f_x/f_0 = 3/2$. При небольшой разнице частот фигура на экране медленно вращается, проходя все фазовые соотношения от 0 до 360°. Разницу частот Δf можно определить, если заметить время изменения фазы на 360°, т. е. ее период T. Тогда $\Delta f = 1/T$. Так можно определить разность частот до долей герца.

Осциллографы используют также для измерения постоянных и переменных напряжений, емкостей, сопротивлений, для наблюдения резонансных кривых контуров, полосы пропускания усилителей, коэффициентов стоячей волны в фидере, степени согласования кабелей, девиации частоты, индекса фазовой модуляции и для многих других измерений и исследований.

ОГЛАВЛЕНИЕ